

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**PARÂMETROS DE COMPRESSIBILIDADE E
PERMEABILIDADE AO AR DE SOLOS SOB PLANTIO
DIRETO**

TESE DE DOUTORADO

Marcelo Ivan Mentges

Santa Maria, RS, Brasil

2014

PARÂMETROS DE COMPRESSIBILIDADE E PERMEABILIDADE AO AR DE SOLOS SOB PLANTIO DIRETO

Marcelo Ivan Mentges

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção de grau de **Doutor em Ciência do Solo.**

Orientador: Prof. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS, Brasil

2014

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Mentges, Marcelo Ivan
PARÂMETROS DE COMPRESSIBILIDADE E PERMEABILIDADE AO
AR DE SOLOS SOB PLANTIO DIRETO / Marcelo Ivan Mentges.-
2014.
134 p.; 30cm

Orientador: José Miguel Reichert
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2014

1. capacidade de suporte de carga 2. suscetibilidade à
compactação 3. elasticidade do solo 4. fluxo de ar I.
Reichert, José Miguel II. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado**

**PARÂMETROS DE COMPRESSIBILIDADE E PERMEABILIDADE AO
AR DE SOLOS SOB PLANTIO DIRETO**

elaborada por
Marcelo Ivan Mentges

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA

José Miguel Reichert, PhD
(Presidente/Orientador)

Paulo Ivonir Gubiani, Dr (UFSM)

Luís Carlos Timm, Dr (UFPEL)

Gilberto Loguercio Collares, Dr (UFPEL)

Vilson Antônio Kein, Dr (UPF)

Santa Maria, 24 de outubro de 2014

*Decico esta obra à minha esposa,
Silvia Pretzel Mentges,
com todo amor e carinho.*

AGRADECIMENTOS

A Deus...

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo durante a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Departamento de Solo e, em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade e excelentes condições oferecidas para a realização do curso de doutorado.

Ao professor José Miguel Reichert, pela orientação, amizade e ensinamentos. Também aos professores Paulo Ivonir Gubiani, Dalvan José Reinert e Jean Minella, pela amizade e ensinamentos.

Aos demais professores e funcionários do PPGCS e do DS.

Aos colegas do PPGCS, pelo convívio, amizade e ensinamentos.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Física do Solo.

Ao Campo de Instrução Barão de São Borja, especialmente ao Diretor, Cel Eng Gladstone Themóteo Menezes Brito da Silva e ao Sub-Diretor, Maj Eng Paullo Norberto Conceição Silva, pelo apoio e incentivos prestados.

Um agradecimento especial a minha esposa Silvia Pretzel Mentges, pelo amor, amizade, companheirismo, carinho, compreensão e também pelas importantes correções gramaticais realizadas neste trabalho.

Aos meus sogros, Leonel e Ilse, pelo constante apoio.

Aos meus pais, Nolar e Cecília Mentges, que sempre me deram condições para estudar e me apoiaram nas decisões tomadas. Também a minha avó, Anita, e as minhas irmãs, Lenise e Thaís, que sempre me deram força.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a minha formação e para a realização deste estudo, meu MUITO OBRIGADO.

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

PARÂMETROS DE COMPRESSIBILIDADE E PERMEABILIDADE AO AR DE SOLOS SOB PLANTIO DIRETO

AUTOR: MARCELO IVAN MENTGES

ORIENTADOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 24 de outubro de 2014.

O processo de compactação pode ser avaliado pela curva de compressão do solo. O segmento curvo da curva de compressão apresenta as deformações elásticas, aquelas que são recuperáveis no solo, enquanto que o segmento linear representa as deformações plásticas. A capacidade do solo em promover uma adequada troca de gases entre o ambiente radicular e a atmosfera afeta diretamente o crescimento de plantas e a produção das culturas, o que torna a quantificação de propriedades relacionadas com a capacidade de transmitir oxigênio até as raízes fundamental para a avaliação da qualidade física do solo. O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a influência da umidade, da condição estrutural e da composição na compressibilidade e permeabilidade ao ar de três Latossolos e um Argissolo manejados no sistema plantio direto. Propriedades elásticas, compressivas, permeabilidade ao ar, propriedades físico-hídricas, granulometria e teor de matéria orgânica foram avaliadas em amostras de solo equilibradas nas tensões de 1, 3, 6, 10, 30, 50, 100, 300 e 500 kPa. A umidade volumétrica ao longo do ciclo de cultivo da soja foi estimada pelo balanço hídrico seqüencial e seu efeito, juntamente com o da condição estrutural, foi utilizado na estimativa da capacidade de suporte de carga e da suscetibilidade a compactação. Efeito significativo das variáveis físicas, teor de argila e matéria orgânica foram observados na elasticidade do solo, enquanto que a umidade apresentou um efeito reduzido em tal propriedade. Quanto maiores os teores de argila e matéria orgânica no solo, maiores os valores de elasticidade. A condição estrutural afeta diretamente a elasticidade, principalmente em solos arenosos, enquanto que em solos argilosos os teores de argila e matéria orgânica exercem maior influência sobre o comportamento elástico do solo. Em solos arenosos o efeito da umidade na suscetibilidade à compactação é menor, sendo que ela é mais afetada pela densidade do solo, enquanto que em solos argilosos, em função da maior capacidade de reter água, é a umidade que determina a variação do índice de compressão do solo ao longo de um ciclo de cultivo. Os modelos apresentaram um ajuste satisfatório quando estimada a variável índice de compressão, enquanto que a capacidade de estimar a pressão de preconsolidação foi baixa para todos os solos. A adaptação do modelo de Busscher para a estimativa da pressão de preconsolidação, apesar da baixa confiabilidade, demonstrou que a capacidade de suporte de carga varia ao longo de um ciclo de cultivo e que os solos arenosos são mais resistentes à compactação que os solos argilosos. Os efeitos da compactação na permeabilidade ao ar se concentram principalmente na redução da porosidade de aeração e da continuidade de poros, independentemente da condição de umidade, o que repercute negativamente nos valores de permeabilidade ao ar. Em solos arenosos, o incremento na permeabilidade ao ar à medida que a umidade do solo reduz é maior se comparado a solos argilosos. Em solos cultivados sob plantio direto, o efeito da umidade na permeabilidade ao ar está associado à maior quantidade e continuidade de poros do solo disponíveis para que os fluxos de ar ocorram.

Palavras-chave: Elasticidade do solo. Compressibilidade do solo. Fluxo de ar.

ABSTRACT

Doctorate Thesis
Post-Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria

COMPRESSIBILITY PARAMETERS AND AIR PERMEABILITY OF SOILS UNDER NO-TILLAGE

AUTHOR: MARCELO IVAN MENTGES

ADVISER: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Place and date of the defense: Santa Maria, October 24, 2014.

The compaction process can be evaluated by soil compression curve. The curved segment of the compression curve shows the elastic deformation, while the linear segment represents the elastic deformation. The soil capacity to promoting adequate gas exchange between the root environment and the atmosphere affect plant growth and crop yield, thus showing the importance of quantifying properties related to soil ability to transmit oxygen to roots as key for the evaluation of soil physical quality. The general objective was to evaluate the effect of water content, soil structure and composition on the compressibility and air permeability of three Hapludox and one Paleudalf under no-tillage. Elastic and compressive properties, air permeability, physico-hydraulic properties, particle size and organic matter content were evaluated in soil samples equilibrated at 1, 3, 6, 10, 30, 50, 100, 300 and 500 kPa tensions. The water content along soybeans growing cycle was estimated by sequential hydrological balance and its effect on soil structural conditions was used for estimating soil bearing capacity and soil compactation susceptibility. Significant effect of the physical variables clay and soil organic matter content were observed in soil elasticity, while water content presented a reduced effect in such property. Greater clay and soil organic matter contents were associated to higher values of soil elasticity. The structural condition affects elasticity directly, mainly in sandy soils, while in loamy soils clay and organic matter contents have a larger influence on the soil elastic behavior. In sandy soils the effect of water content in soil compaction susceptibility is lower and it is most affect by soil density, while clay soils, because they retain more water, soil water content determined the compressive index variation along the management cycle. The models showed a satisfactory adjustment when the compression index was estimated, while the capacity of estimation precompaction pressure was lower for all soils. The adaption of Busscher's model for estimating soil precompaction pressure, despite the low reliability, showed that soil load bearing capacity varies along the management cycle and that sandy soils are more resistant to compactation that clay soils. The compaction effects on soil air permeability is realted mainly to air-filled porosity and soil pore continuity, independently on water content that affects adversely air permeability. In sandy soils air permeability increases as soil water content decreases is larger, compared to loamy soils. In soils cultivated under no-tillage, water content effect on air permeability is associated with greater quantity and continuity of soil pores available for airflow to occur.

Key-words: Soil elasticity. Soil compressibility. Air flow. Water balance.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo de cultivo sob plantio direto, culturas utilizadas e integração com pecuária.	42
Tabela 2 - Teor de areia, silte e argila, densidade de partículas (Dp), matéria orgânica do solo (MOS), limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) e umidade volumétrica (Uv) em amostras equilibradas nas tensões de 10 kPa (Uv10 kPa) e 33 kPa (Uv33 kPa) dos solos estudados.....	43
Tabela 3 – Equações lineares ajustadas em função da largura (L) e comprimento (C) do folíolo central dos trifólios, para a estimativa da área total do trifólio ($AT_{\text{trifólio}}$) da soja nos solos em estudo. R^2 : coeficiente de determinação; N: tamanho da amostra.....	52
Tabela 4 – Datas de semeadura, emergência e colheita, duração do ciclo, cultivar, hábito de crescimento, população de plantas, profundidade inicial (Ze_{ini}) e máxima (Ze_{max}) do sistema radicular e índice foliar máximo (IAF_{max}) realizadas e/ou observadas nos solos avaliados.....	56
Tabela 5 – Valores médios de densidade do solo (Ds), umidade volumétrica do solo saturado (Uv_{SAT}), na capacidade de campo (Uv_{CC}) e no ponto de murcha permanente (Uv_{PMP}) das camadas em que foram realizados os cálculos do balanço hídrico do solo, considerando a profundidade máxima do sistema radicular (Tabela 4).....	57
Tabela 6 - Valor mínimo, médio e máximo, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) da densidade do solo (Ds), índice de vazios (lv) e umidade volumétrica (Uv) dos solos avaliados.....	63
Tabela 7 - Significância ($Pr > F$), coeficiente angular (a), intercepto (b), coeficiente de determinação (R^2) e número de amostras (N) da regressão linear para a variável dependente (VD) coeficiente de descompressão (Cd) e as variáveis independentes (VI) densidade do solo (Ds) e índice de vazios (lv) dos solos avaliados.....	70
Tabela 8 - Significância ($Pr > F$), coeficiente angular (a), intercepto (b), coeficiente de determinação (R^2) e número de amostras (N) da regressão linear para a variável dependente (VD) índice de recuperação (lr) e as variáveis independentes (VI) densidade do solo (Ds) e índice de vazios (lv) dos solos avaliados.....	75
Tabela 9 - Significância ($Pr > F$), coeficiente angular (a), intercepto (b), coeficiente de determinação (R^2) e número de amostras (N) da regressão linear para as variáveis dependentes (VD) coeficiente de descompressão (Cd) e índice de recuperação (lr) e as variáveis independentes (VI) argila e matéria orgânica do solo (MOS) dos solos avaliados.....	80

Tabela 10 - Valor mínimo, médio e máximo, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) da densidade do solo (D_s), umidade volumétrica (U_v), pressão de preconsolidação (σ_p) e índice de compressão (I_c) dos solos avaliados.....	82
Tabela 11 – Significância ($Pr > F$), coeficiente angular (a), intercepto (b), coeficiente de determinação (R^2) e número de amostras (N) da regressão linear para a variável dependente (VD) “pressão de preconsolidação (σ_p)” e a variável independente (VI) “densidade do solo (D_s)” dos solos avaliados.....	85
Tabela 12 – Significância ($Pr > F$), coeficiente angular (a), intercepto (b), coeficiente de determinação (R^2) e população amostral (N) da regressão linear para a variável dependente (VD) “índice de compressão (I_c)” e a variável independente (VI) “densidade do solo (D_s)” dos solos avaliados.....	90
Tabela 13 – Significância ($Pr > F$), coeficiente angular (a), intercepto (b), coeficiente de determinação (R^2) e população amostral (N) da regressão linear para as variáveis dependentes (VD) “pressão de preconsolidação (σ_p)” e índice de compressão (I_c)” e a variável independente (VI) “argila” dos solos avaliados.....	92
Tabela 14 – Equações para a estimativa da pressão de preconsolidação (σ_p) dos solos avaliados, segundo modelos adaptados de Imhoff et al.(2004) e Busscher (1990).....	93
Tabela 15 – Equações para a estimativa do índice de compressão (I_c) dos solos avaliados, segundo modelos adaptados de Imhoff et al.(2004) e Busscher (1990).....	93
Tabela 16 – Valor mínimo, médio e máximo, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) da densidade do solo (D_s), porosidade total (P_t), umidade volumétrica (U_v), porosidade de aeração (E_a) e continuidade de poros [$\log_{10} (k_1+1)$] dos solos avaliados.....	102
Tabela 17 – Parâmetros da regressão do modelo $\log_{10} (K_a+1) = \log_{10} M + N \log_{10} E_a$ e porosidade de aeração bloqueada (E_b) de diferentes classes de densidade dos solos avaliados.....	115

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Ilustração da curva de compressão do solo, com indicação da reta de compressão virgem, reta de descompressão e demais variáveis obtidas. ΔI_{V_C} = variação do índice de vazios durante o carregamento; ΔI_{V_D} = variação do índice de vazios durante o descarregamento; C_d = coeficiente de descompressão; I_c = índice de compressão; σ_P = pressão de preconsolidação.....29
- Figura 2 – Amostragem realizada em maio de 2010.....42
- Figura 3 – Valores diários das variáveis meteorológicas temperatura média do ar (T_m), saldo de radiação (R_n), umidade relativa do ar (UR) e evapotranspiração de referência (E_{To}) durante o período de cultivo no PVAd, localizado em Santa Maria/RS.....49
- Figura 4 – Valores diários das variáveis meteorológicas temperatura média do ar (T_m), saldo de radiação (R_n), umidade relativa do ar (UR) e evapotranspiração de referência (E_{To}) durante o período de cultivo no LVd, localizado em Passo Fundo/RS.....50
- Figura 5 – Valores diários das variáveis meteorológicas temperatura média do ar (T_m), saldo de radiação (R_n), umidade relativa do ar (UR) e evapotranspiração de referência (E_{To}) durante o período de cultivo no LVdf-VG e LVdf-NMT, localizados, respectivamente, em Victor Graeff/RS e Não-Me-Toque/RS.....51
- Figura 6 – Valores diários do coeficiente de cultura (k_c) e do índice de área foliar (IAF) para o LVd (ponto 2).....53
- Figura 7 – Precipitação (P) (colunas), evapotranspiração real (ETr), capacidade de água disponível (CAD) e armazenamento da água no solo (ARMZ) para um dos cálculos do balanço hídrico realizado para o cultivo de soja em um PVAd (ponto 1), localizado no município de Santa Maria/RS. DAE= dias após emergência.....55
- Figura 8 – Relação do coeficiente de descompressão com a densidade do solo (D_s) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.....66
- Figura 9 – Relação do coeficiente de descompressão com a densidade do solo (D_s) em um Latossolo Vermelho Distroférrico típico – Victor Graeff (a) e Latossolo Vermelho Distroférrico típico - Não-Me-Toque (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.....67
- Figura 10 – Relação do coeficiente de descompressão com o índice de vazios (I_v) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um

Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.....68

Figura 11 – Relação do coeficiente de descompressão com o índice de vazios (I_v) em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.....69

Figura 12 – Relação do índice de recuperação com a densidade do solo (D_s) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.....71

Figura 13 – Relação do índice de recuperação com a densidade do solo (D_s) em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.....72

Figura 14 – Relação do índice de recuperação com o índice de vazios (I_v) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.....73

Figura 15 – Relação do índice de recuperação com o índice de vazios (I_v) em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.....74

Figura 16 – Relação do coeficiente de descompressão (a) e do índice de recuperação (b) com a quantidade de argila em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.....78

Figura 17 – Relação do coeficiente de descompressão (a) e do índice de recuperação (b) com a quantidade de matéria orgânica do solo (MOS) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.....79

Figura 18 – Relação da pressão de preconsolidação com a densidade do solo (D_s) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.....83

Figura 19 – Relação da pressão de preconsolidação com a densidade do solo (D_s) em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.....84

Figura 20 – Relação do índice de compressão com a densidade do solo (D_s) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.....88

Figura 21 – Relação do índice de compressão com a densidade do solo (D_s) em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.....89

Figura 22 – Relação da pressão de preconsolidação (a) e do índice de compressão (b) com a quantidade de argila em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.....91

Figura 23 – Precipitação (a), umidade volumétrica (b), índice de compressão (c) e pressão de preconsolidação em duas condições de densidade do solo ao longo do ciclo da soja em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, Santa Maria/RS. As linhas tracejadas nas cores azul e vermelha referem-se ao limite superior do intervalo de confiança da pressão de preconsolidação. ----- representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Trator Massey Ferguson 275 4x2 TDA; representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Colhedora de cereais John Deere 1175 4x2; ----- representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Pulverizados Autopropelido UNIPORT Jacto 4x2 (CARDOSO, 2007).....95

Figura 24 – Precipitação (a), umidade volumétrica (b), índice de compressão (c) e pressão de preconsolidação em duas condições de densidade do solo ao longo do ciclo da soja em um Latossolo Vermelho Distrófico típico, Passo Fundo/RS. As linhas tracejadas nas cores azul e vermelha referem-se ao intervalo de confiança da pressão de preconsolidação. ----- representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Trator Massey Ferguson 275 4x2 TDA; representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Colhedora de cereais John Deere 1175 4x2; ----- representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Pulverizados Autopropelido UNIPORT Jacto 4x2 (CARDOSO, 2007).....96

Figura 25 – Precipitação (a), umidade volumétrica (b), índice de compressão (c) e pressão de preconsolidação em duas condições de densidade do solo ao longo do ciclo da soja em um Latossolo Vermelho Distroférico típico, Victor Graeff/RS. As linhas tracejadas nas cores azul e vermelha referem-se ao intervalo de confiança da pressão de preconsolidação. ----- representa a pressão de contato pneu/solo

exercida por um Trator Massey Ferguson 275 4x2 TDA; representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Colhedora de cereais John Deere 1175 4x2; significa a a pressão de contato pneu/solo exercida por um Pulverizados Autopropelido UNIPORT Jacto 4x2 (CARDOSO, 2007).....97

Figura 26 – Precipitação (a), umidade volumétrica (b), índice de compressão (c) e pressão de preconsolidação em duas condições de densidade do solo ao longo do ciclo da soja em um Latossolo Vermelho Distroférico típico, Não-Me-Toque/RS. As linhas tracejadas nas cores azul e vermelha referem-se ao intervalo de confiança da pressão de preconsolidação. ----- representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Trator Massey Ferguson 275 4x2 TDA; representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Colhedora de cereais John Deere 1175 4x2; representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Pulverizados Autopropelido UNIPORT Jacto 4x2 (CARDOSO, 2007).....98

Figura 27 – Relação da porosidade de aeração (E_a) com a umidade volumétrica (U_v) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5 % (*) e 1% (**) de erro.....104

Figura 28 – Relação da porosidade de aeração (E_a) com a umidade volumétrica (U_v) em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e um Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5 % (*) e 1% (**) de erro.....105

Figura 29 – Relação da continuidade de poros [$\log_{10} (K_1+1)$] com a umidade volumétrica (U_v) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5 % (*) e 1% (**) de erro.....106

Figura 30 – Relação da continuidade de poros [$\log_{10} (K_1+1)$] com a umidade volumétrica (U_v) em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e um Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5 % (*) e 1% (**) de erro.....107

Figura 31 – Relação da permeabilidade ao ar [$\log_{10} (K_a+1)$] com a umidade volumétrica (U_v) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5 % (*) e 1% (**) de erro.....108

Figura 32 – Relação da permeabilidade ao ar [$\log_{10} (K_a+1)$] com a umidade volumétrica (U_v) em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e

um Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5 % (*) e 1% (**) de erro.....109

Figura 33 – Relação da permeabilidade ao ar [$\log_{10} (Ka+1)$] com continuidade de poros [$\log_{10} (K1+1)$] em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5 % (*) e 1% (**) de erro.....110

Figura 34 – Relação da permeabilidade ao ar [$\log_{10} (Ka+1)$] com a continuidade de poros [$\log_{10} (K1+1)$] em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e um Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5 % (*) e 1% (**) de erro.....111

Figura 35 – Relação logarítmica entre a permeabilidade ao ar [$\log_{10} (Ka+1)$] e a porosidade de aeração ($\log_{10} Ea$) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5 % (*) e 1% (**) de erro.....113

Figura 36 – Relação logarítmica entre a permeabilidade ao ar [$\log_{10} (Ka+1)$] e a porosidade de aeração ($\log_{10} Ea$) em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e um Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5 % (*) e 1% (**) de erro.....114

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 - Pontos amostrados na lavoura de soja localizada no município de Santa Maria (imagem retirada do Google Earth).	131
Anexo 2 - Pontos amostrados na lavoura de soja localizada no município de Passo Fundo (imagem retirada do Google Earth).	132
Anexo 3 - Pontos amostrados na lavoura de soja localizada no município de Victor Graeff (imagem retirada do Google Earth).	133
Anexo 4 - Pontos amostrados na lavoura de soja localizada no município de Não-Me-Toque (imagem retirada do Google Earth).	134

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	27
2 HIPÓTESES.....	37
3 OBJETIVOS.....	39
3.1 Objetivo geral.....	39
3.2 Objetivos específicos.....	39
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	41
4.1 Solos e condições de estudo.....	41
4.2 Caracterização física e matéria orgânica do solo.....	43
4.3 Propriedades físico-hídricas.....	45
4.4 Estimativa do conteúdo de água do solo.....	45
4.4.1 Crescimento do sistema radicular.....	46
4.4.2 Evapotranspiração.....	47
4.4.3 Armazenamento.....	53
4.5 Condução da cultura da soja.....	56
4.6 Ensaio de compressão uniaxial.....	57
4.7 Permeabilidade do solo ao ar.....	59
4.8 Análise estatística.....	60
4.8.1 Relação da pressão de preconsolidação e o índice de compressão com a densidade e o conteúdo de água no solo.....	61
4.8.2 Relação entre permeabilidade ao ar e porosidade de aeração.....	62
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
5.1 Elasticidade do solo.....	63
5.2 Capacidade de suporte de carga e suscetibilidade à compactação.....	81
5.3 Permeabilidade do solo ao ar.....	101
6 CONCLUSÕES.....	119
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	121
8 LITERATURA CITADA.....	123

1 INTRODUÇÃO

A população mundial tem aumentado consideravelmente desde a década de 50. Estudo publicado pela ONU (2011) mostra que em 1950 éramos aproximadamente 2,5 bilhões de habitantes, em 1975 quatro bilhões e ao final de 2011 aproximadamente sete bilhões de pessoas habitavam a terra, além de apontar para uma tendência de que, em 2050, a população mundial poderá ser de 9,3 bilhões habitantes. Esse considerável aumento na população aliado ao aumento na renda dos países em desenvolvimento que, por consequência, consomem mais, repercute diretamente na necessidade de aumento na quantidade de alimentos produzidos (TILMAN et al., 2011), fibras e energia.

A produção agropecuária é responsável por grande parte dos produtos cultivados e destinados à alimentação. Além disso, culturas como a soja, cana-de-açúcar, girassol são fontes potenciais e utilizadas para a produção de bioenergia. Para suprir essa demanda de alimentos e energias renováveis, duas condições são observadas: a necessidade de aumento da área cultivada ou a elevação na produtividade. Informações da Conab (2013) indicam, no Brasil, um aumento de 3,6% da área cultivada com grãos na safra 2013/2014 em relação à safra 2012/2013 (53,27 e 55,19 milhões de hectares nas safras de 2012/2013 e 2013/2014, respectivamente).

Com o intuito de proporcionar adequadas condições de solo às plantas, inúmeras tecnologias vêm sendo incorporadas aos sistemas de produção. Uma das principais, em relação ao manejo do solo, foi o sistema plantio direto, que teve uma grande aceitação e utilização pelos agricultores. Até a safra 2011/2012, 31,8 milhões de hectares eram cultivados sob esse sistema (FEBRAPDP, 2014). O plantio direto, que tem como característica principal o não revolvimento e a manutenção dos restos vegetais das culturas sobre a superfície do solo, foi desenvolvido com o propósito de diminuir os problemas relativos à degradação, principalmente àqueles relacionados aos processos erosivos.

O sistema plantio direto proporciona vários benefícios ao solo, às plantas e ao ambiente, como maior retenção de água, possibilitando à cultura uma maior resistência a períodos de seca, redução da erosão, o que diminui a perda de solo e

fertilizantes e contribui para a manutenção da sustentabilidade do sistema agrícola. No entanto, solos manejados sob esse sistema, principalmente quando alguns pressupostos básicos são sonegados (AMADO, 2011), podem apresentar problemas de compactação. Alterações estruturais têm sido identificadas em solos cultivados alguns anos sob esse sistema. Dados publicados e observações visuais indicam que solos sob plantio direto têm apresentado compactação, a qual ocorre na camada localizada entre 8 cm e 15 cm de profundidade (REICHERT et al., 2009a; MENTGES et al., 2010), provocada pelo confinamento das pressões que ocorrem próximo a essa profundidade.

A compactação consiste em um processo de densificação que ocorre no solo quando uma pressão externa é aplicada sobre o mesmo (SOANE; van OUWERKERK, 1994) e supera a capacidade de suporte de cargas (ALAKUKU et al., 2003). O tráfego de máquinas agrícolas é apontado como a principal fonte geradora dessas pressões, sendo considerado como fator determinante da ocorrência da compactação (VEIGA et al., 2007; VOGELMANN et al., 2012). Outros fatores também são considerados, como o revolvimento reduzido do solo, o uso de equipamentos pesados, aumento da carga por eixo e operações de campo em condições de elevada umidade (REICHERT et al., 2007).

O processo de compactação do solo pode ser avaliado pela curva de compressão, que representa graficamente o logaritmo da pressão externa aplicada a um corpo de prova, simulando a pressão exercida por um pneu agrícola com algum parâmetro ligado à estrutura do solo, como o índice de vazios ou a densidade do solo (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; CAVALIERI et al., 2008). Transformando as pressões aplicadas para a escala logarítmica de base dez, a curva de compressão tem conformação bi-linear, evidenciando regiões de deformações elásticas e plásticas, o ponto de máxima curvatura (PMC) e ponto de inflexão (PI). O valor de σ , que divide essas duas regiões, é definido como pressão de preconsolidação (σ_p) e a inclinação da reta virgem (RV) é definida como índice de compressão (I_c). O segmento curvo da curva de compressão (denominado de curva de compressão secundária) apresenta as deformações elásticas, aquelas que são recuperáveis no solo e as propriedades físicas se mantêm constantes. O segmento linear, chamado de reta de compressão virgem, representa as deformações plásticas (não-recuperáveis) e as propriedades físicas do solo alteram-se consideravelmente. Maiores detalhes da curva de compressão do solo são apresentados na Figura 1.

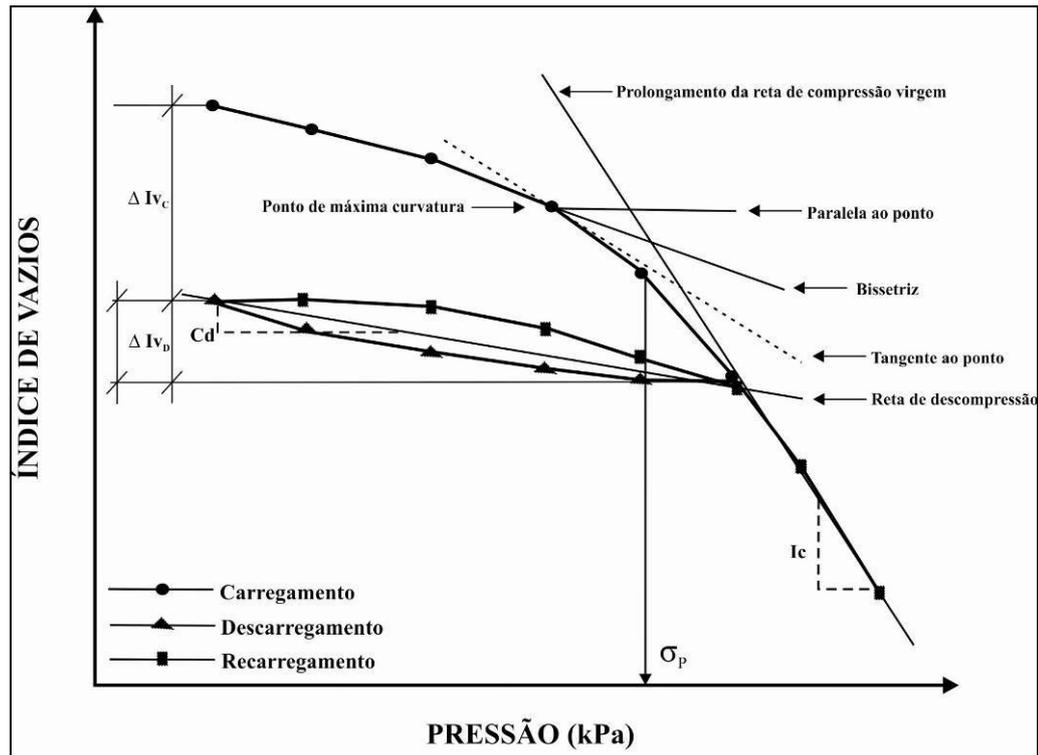


Figura 1 – Ilustração da curva de compressão do solo, com indicação da reta de compressão virgem, reta de decompressão e demais variáveis obtidas. ΔI_{v_C} = variação do índice de vazios durante o carregamento; ΔI_{v_D} = variação do índice de vazios durante o descarregamento; C_d = coeficiente de decompressão; I_c = índice de compressão; σ_p = pressão de preconsolidação.

A σ_p representa o valor máximo que se pode aplicar ao solo sem que esse sofra compactação adicional a sua estrutura (HOLTZ; KOVACS, 1981) e o I_c refere-se ao processo de decréscimo de volume do solo quando ele é submetido à aplicação de uma pressão externa (KOOLEN, 1994). Quanto maior o estado de compactação, menor será a deformação do solo após a aplicação de uma pressão, pois ele pode estar próximo de sua densidade máxima (SUZUKI et al., 2008). Também, quanto maior a densidade inicial do solo, menor sua susceptibilidade à compactação e maior a capacidade de suporte de carga (DEBIASI et al., 2008).

A granulometria também exerce influência sobre a compressibilidade, uma vez que essa atua na capacidade de retenção de água e na coesão, as quais interferem na σ_p . O comportamento compressivo de diferentes solos com ampla variação textural mostrou que o solo mais argiloso, dada a sua maior capacidade de retenção de água, necessita de maiores cuidados com o tráfego de máquinas, pois

apresenta maior susceptibilidade à compactação quando cargas superiores às que o solo já sofreu foram aplicadas (SUZUKI, 2005). Além desses, a matéria orgânica também atua na compressibilidade do solo (BRAIDA et al., 2008), afetando sua elasticidade. Segundo Veiga et al. (2007), a adição de cama de aviário ao solo reduziu os valores da σ_p e aumentou os valores do I_c , implicando em alta susceptibilidade à compactação.

O risco de compactação é elevado quando as pressões aplicadas são maiores do que a capacidade de suporte do solo. A umidade do solo é uma das responsáveis pela redução da capacidade de suporte (ARAUJO-JUNIOR et al., 2011), pois atua como lubrificante entre as partículas, reduzindo a coesão e o atrito e permitindo o deslocamento das mesmas, o que favorece a ocorrência da compactação. Pesquisas mostram que a umidade do solo é altamente variável ao longo do tempo, principalmente nas camadas superficiais (REICHERT et al., 2009b). Sua variação está ligada à precipitação pluviométrica que chega a superfície do solo, a sua capacidade de infiltrar e reter água e as perdas por drenagem, escoamento superficial e evapotranspiração (KRAMER; BOYER, 1995). Esses fatores são diferentes entre locais, solos, e também ao longo do tempo.

Se a umidade é um fator importante no processo de compactação e altamente dinâmica no tempo, pode-se afirmar que, ao longo do tempo, a susceptibilidade à compactação e a capacidade de suporte de carga também são variáveis. Esse efeito pode ser estimado por meio de modelos matemáticos. Com isso, parâmetros físicos e mecânicos importantes no estudo da compactação do solo podem ser estimados com maior rapidez e facilidade, podendo ser usados como critérios de decisão sobre o momento adequado para realizar as operações mecanizadas (DIAS JUNIOR et al., 2004) e para estudos de qualidade física e estrutural do solo (SILVA et al., 2008).

Modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para estimar a capacidade de suporte de carga dos solos, quantificando os níveis de pressões que podem ser aplicados para evitar que a compactação ocorra, tais como os de Miranda et al. (2003) e Oliveira et al. (2003), que consideram a umidade volumétrica na estimativa da σ_p . Contudo, observando os efeitos diretos da umidade e da estrutura na compressibilidade do solo, um modelo que considere estas variáveis tende a ter uma boa capacidade de predição da ocorrência da compactação. Em três Latossolos com ampla variação textural, Imhoff et al. (2004) estimaram a capacidade de suporte de

carga com um modelo de regressão linear múltipla, considerando como variáveis independentes, a densidade, umidade e o conteúdo de argila do solo.

Um modelo frequentemente utilizado nos estudos referentes à compactação do solo é o proposto por Busscher (1990), o qual estima a resistência do solo à penetração em função da densidade e umidade do solo. Em função da relação da resistência à penetração com a pressão de preconsolidação, já demonstrada nos estudos de Dias Junior et al. (2004) e Suzuki et al. (2008), a adaptação desse modelo para a estimativa da pressão de preconsolidação é coerente.

Em contrapartida ao processo de compactação, o solo, em função de seus componentes, principalmente, matéria orgânica, granulometria, tipos de minerais que ocorrem, ar e água, pode apresentar um comportamento elástico, capaz de recuperar parte de seu volume após ser comprimido por pressões ou cargas externas (SOANE, 1990; PERDOK et al., 2002; BRAIDA et al.; 2008). Essa capacidade chama-se elasticidade do solo e é determinável com ensaio de compressão uniaxial.

Como a curva de compressão considera algum parâmetro ligado à estrutura do solo, alterações nesta afetam a elasticidade do solo (BRAIDA et al., 2008; KELLER et al., 2011; MENTGES et al., 2013). Dörner et al. (2011) apontam que uma análise detalhada das curvas de compressão e re-compressão pode contribuir na avaliação da capacidade recuperação da estrutura do solo. Em diferentes horizontes e condições de uso em um Gleissolo Háptico, Mentges et al. (2013) constataram que a elasticidade depende do tipo de estrutura, com maiores valores nos horizontes que apresentavam estrutura prismática em comparação aos horizontes com estrutura maciça. Tal comportamento pode ser associado a solos com elevado estado de compactação, que apresentam camadas com estrutura maciça, resultante do aumento da densidade e redução do espaço aéreo, da forma, da distribuição e da continuidade de poros (SIMOJOKI et al., 2008; ÉDEN et al., 2011).

O comportamento elástico do solo é afetado por sua composição (SOANE, 1990; ZHANG et al., 2005; GREGORY et al., 2009; KELLER et al., 2011; DÖRNER et al., 2011), especialmente os teores de matéria orgânica e argila. Soane (1990) aponta que as partículas orgânicas tendem a retornar a forma inicial após sofrerem uma pressão externa, deslocando consigo as partículas minerais, resultando em expansão do solo após o descarregamento da pressão aplicada. A importância da granulometria na elasticidade esta associada principalmente ao seu efeito na

retenção de água. Solos argilosos tendem a apresentar uma maior retenção de água, o que pode proporcionar uma maior elasticidade em virtude do maior aprisionamento de bolhas de ar (PERDOK et al., 2002; BRAIDA et al., 2008).

Avaliando a elasticidade em um Nitossolo Vermelho distrófico e um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, Braida et al. (2008) observaram o efeito significativo da variação do conteúdo de água das amostras no comportamento elástico do solo. Quanto mais seco estiver o solo, mais facilmente o ar é expulso dos poros durante a sua compressão. Nas amostras mais úmidas, a maior quantidade de água dificulta a expulsão do ar dos poros do solo, aumentando o confinamento de bolhas de ar, resultando em aumento da elasticidade do solo.

Dentre as funções do solo, uma das mais importantes é fornecer ao sistema radicular das plantas um ambiente adequado para o seu crescimento e desenvolvimento. A capacidade do solo em promover uma adequada troca de gases entre o ambiente radicular e a atmosfera afeta diretamente o crescimento de plantas e a produção das culturas (STEPNIEWSKI et al., 1994; TANG et al., 2011), enquanto que o sistema poroso afeta sensivelmente a aeração do solo (SCHØNNING et al., 2002; TULI et al., 2005; DEEPAGODA et al., 2011).

Por apresentar uma relação estreita com a estrutura, Tang et al. (2011) reconheceram a permeabilidade ao ar (K_a) com um dos mais apropriados parâmetros para avaliação das consequências da compactação do solo, pois consegue diagnosticar de maneira eficiente as alterações na macroporosidade devido às práticas de manejo (ROSEBERG; McCOY, 1992). Nesse sentido, Horn (2004) aponta que um melhor entendimento nos processos de deformação do solo pelos sistemas de manejo é necessário para determinar os efeitos no funcionamento dos poros.

A K_a caracteriza a habilidade do solo em conduzir, por fluxo de massa, gás em resposta a gradientes de pressão (STEPNIEWSKI et al., 1994). Estudos têm avaliado e comprovado a relação da K_a com outras variáveis também sensíveis à estrutura e indicadoras de fluxo de água no solo, como a condutividade hidráulica (CHIEF et al., 2008) e a taxa de infiltração de água (SEYFRIED; MURDOCK, 1997). Por apresentar essa relação, Horn et al. (2007) apontaram que uma possível redução na K_a pode indicar problemas de estagnação de água ou elevada umidade do solo e culminar num aumento das possibilidades de ocorrência de processos erosivos.

O efeito do tráfego de máquinas ou do estado de compactação na K_a foi objetivo de algumas pesquisas realizadas (HORN et al., 2007; MOSADDEGHI et al., 2007; SIMOJOKI et al., 2008; TANG et al., 2011; SILVA et al., 2009; WEISSKOPF et al., 2010; EDEN et al., 2011). A compactação reduziu o volume de poros e a K_a em dois Nitossolos argilosos cultivados com pastagem e feijão (SILVA et al., 2009) e em um Cambissolo franco (WEISSKOPF et al., 2010). Em um Luvisso de textura siltosa, Simojoki et al. (2008) observaram que pressões externas que superam a resistência dos agregados do solo, destroem a continuidade de poros existentes e criam uma estrutura mais densa e menos permeável. Utilizando amostras construídas de três Cambissolos com ampla variação textural, Tang et al. (2011) demonstraram que pressões que superam a capacidade de suporte de carga do solo reduzem o espaço aéreo e o índice de vazios, o que reduz a K_a .

Segundo Tuli et al. (2005), o comportamento da K_a é dependente do tamanho e da continuidade dos macroporos, o que justifica sua utilização na estimativa do espaço poroso que contribui para a transmissão de ar e água no solo. Para Horn (2004), durante um longo e contínuo uso de sistemas conservacionistas, como no caso o sistema plantio direto, é esperado um sistema poroso estável e funcional, o que poderia contribuir positivamente para o incremento dos fluxos de ar no solo. No entanto, estudos apontam para uma redução na permeabilidade ao ar em solos sob plantio direto, principalmente, pela redução no espaço aéreo (E_a), no diâmetro efetivo e na continuidade e no aumento na tortuosidade dos poros (RODRIGUES et al., 2011).

A conteúdo de água no solo também afeta diretamente a K_a , pois ela influencia a quantidade de poros ocupados pelo ar, o que tem relação direta com a tortuosidade e continuidade de poros, o número e o diâmetro dos poros que atuam no transporte do ar e o espaço aéreo bloqueado (SEYFRIED; MURDOCK, 1997; SCHJØNNING et al., 2002; MOLDRUP et al., 2001; SILVA et al., 2009; RODRIGUES et al., 2011). Em dois Nitossolos argilosos, Silva et al. (2009) observaram que, à medida que a umidade reduziu, os valores de K_a aumentaram, comportamento explicado pela formação de caminhos preferenciais contínuos através dos poros quando a água é drenada.

Em um Latossolo Vermelho com textura muito argilosa cultivado sob preparo convencional e plantio direto durante 23 anos, Rodrigues et al. (2011) observaram que, mesmo com uma porosidade elevada, a K_a pode ser nula caso todos os poros

estejam preenchidos com água e/ou estejam isolados (não conectados). No entanto, à medida que maiores tensões foram aplicadas ao solo, o E_a aumentou, elevando de forma exponencial os valores K_a observados. À medida que aumenta o E_a , a tortuosidade dos poros é reduzida e o número de poros que atuam no fluxo aumentados, favorecendo a K_a , tal como demonstrado por Moldrup et al. (2001) em oito diferentes solos com variação na classe textural e Schjonning et al. (2002) em dois solos franco arenosos cultivados sob diferentes sistemas de manejo e rotações de culturas durante 50 anos.

A granulometria do solo, por afetar as características do E_a (McCARTHY; BROWN, 1992) e provocar diferenças na capacidade de retenção de água (MOSADDEGHI et al., 2007; DEEPAGODA et al., 2011), também pode afetar o comportamento da K_a . Em amostras indeformadas com ampla variação na granulometria, McCarthy e Brown (1992) observaram que a estrutura e a distribuição do tamanho de poros afetou a K_a e apontaram o teor de argila como principal responsável por essas alterações. Solos argilosos apresentaram predominantemente poros de menor tamanho, culminando na redução da K_a .

As diferenças na retenção da água e no E_a foram apontadas por Deepagoda et al. (2011) como responsáveis pelos diferentes valores de K_a , quando avaliada na mesma tensão em solos urbanos, florestais e utilizados com lavoura de oito locais da Dinamarca. Comportamento semelhante foi observado por Mosaddeghi et al. (2007) em cinco solos cultivados no Iran. Esses autores observaram que, em solos arenosos, a taxa de incremento da K_a é maior que em solos argilosos, em função da menor retenção de água e maior continuidade de poros que ocorre nos primeiros.

Assim, considerando toda a dinâmica que envolve a ocorrência do processo de compactação e a ocorrência de restrições ao desenvolvimento de plantas por problemas relacionados aos fluxos de ar que ocorrem no solo, esse estudo procurará elucidar como e quanto a variação da umidade do solo ao longo do ciclo vegetativo pode afetar tais processos, principalmente, quando considera-se as diferenças existentes entre classes de solo e níveis de compactação. Para tanto, quatro áreas comerciais (três Latossolos e um Argissolo) manejadas com plantio direto foram amostradas e monitoradas, a fim de responder os propósitos dessa pesquisa.

Primeiramente, buscou-se identificar quais são as diferenças no comportamento compressivo de solos com características físicas distintas, ou seja,

compreender como diferenças na granulometria, matéria orgânica, estrutura e conteúdo de água no solo afetam tal comportamento (deformações elásticas e plásticas). Por fim, as alterações no espaço aéreo e, principalmente, na permeabilidade ao ar foram avaliadas, procurando compreender quais variáveis são importantes na dinâmica desses processos no solo.

2 HIPÓTESES

Solos argilosos são mais elásticos, possuem menor capacidade de suporte de carga e são mais suscetíveis à compactação que solos arenosos, sendo que estas propriedades são afetadas pelo estado de compactação e conteúdo de água. Por consequência, apresentam variação ao longo de um ciclo de cultivo ocorrendo, frequentemente, períodos com elevada suscetibilidade à compactação e baixa capacidade de suporte de carga se comparado à solos com menor quantidade de argila em sua composição.

Em solos cultivados sob plantio direto, a compactação e o maior conteúdo de argila reduzem a continuidade e aumentam a tortuosidade dos poros e, por consequência, afetam o comportamento da permeabilidade ao ar, que é menor em solos mais densos e argilosos. No entanto, é o conteúdo de água do solo o fator fundamental no comportamento da permeabilidade ao ar por afetar o espaço aéreo do solo.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar a influência do conteúdo de água, da condição estrutural e da composição na compressibilidade e permeabilidade ao ar de três Latossolos e um Argissolo manejados no sistema plantio direto.

3.2 Objetivos específicos

Avaliar o efeito da densidade do solo, do índice de vazios, do conteúdo de água e dos teores de argila e matéria orgânica na pressão de preconsolidação, índice de compressão, coeficiente de descompressão e índice de recuperação de três Latossolos e um Argissolo manejados no sistema plantio direto.

Estimar a variação da capacidade de suporte de carga e da suscetibilidade à compactação de três Latossolos e um Argissolo ao longo de um ciclo de cultivo, avaliando quando e por quanto tempo condições que propiciem a ocorrência do processo de compactação ocorrem.

Avaliar o efeito das alterações na estrutura, no conteúdo de água e no teor de argila na permeabilidade ao ar de três Latossolos e um Argissolo manejados no sistema plantio direto.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Solos e condições de estudo

Foram estudados quatro solos, classificados, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006) e o Soil Taxonomy (USDA, 1999) como: (i) Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (PVAd) e Paleudalf, localizado no município de Santa Maria – RS (29°43'36,93"S, 53°45'17,75"W); (ii) Latossolo Vermelho Distroférrico típico (LVdf-VG) e Hapludox, localizado no município de Victor Graeff – RS (28°28'44,43"S, 52°50'55,75"W); (iii) Latossolo Vermelho Distroférrico típico (LVdf-NMT) e Hapludox, localizado no município de Não-Me-Toque – RS (28°33'14,16"S, 52°45'06,08"W); e (iv) Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd) e Hapludox, localizado no município de Passo Fundo – RS (28°16'39,99"S, 52°37'22,62" W). Todos os solos eram cultivados sob sistema plantio direto em lavouras comerciais, porém com particularidades quanto ao tempo de uso do sistema e à integração com pecuária (Tabela 1).

Os solos em estudo são formados a partir de distintos materiais de origem. O PVAd é derivado de arenito, o LVd de uma mistura de arenito e basalto, enquanto que o LVdf-VG e o LVdf-NMT de basalto. Essas diferenças proporcionam uma ampla variação granulométrica que, associada a diferentes condições estruturais, obtidas por amostragens realizadas nas camadas de 0 – 0,075m e 0,075 – 0,15m e em distintos pontos nas lavouras, possibilitaram que os objetivos do trabalho fossem alcançados. A camada de 0,075-0,15m é a que apresenta maiores problemas de compactação em solos sob plantio direto (REICHERT et al., 2009a) e, em uma lavoura, a região chamada como cabeceira é a que apresenta maior estado de compactação, condição que reduz em direção aos pontos centrais da lavoura (SILVA et al., 2004).

As amostragens foram realizadas em maio de 2010, quando amostras foram coletadas nas camadas de 0-0,075m e 0,075-0,15m em cada ponto avaliado. No PVAd e no LVdf-NMT foram amostrados três pontos, enquanto que no LVdf-VG e LVd foram amostrados seis pontos em cada lavoura. Na Figura 2 estão ilustrados os

materiais utilizados para as coletas e as profundidades amostradas, enquanto que no Anexo I são apresentadas imagens aéreas (retiradas do Google Earth) dos pontos amostrados em cada área.

Tabela 1 - Tempo de cultivo sob plantio direto, culturas utilizadas e integração com pecuária¹.

Cultivo sob plantio direto (anos)	Culturas		Integração com Pecuária
	Inverno	Verão	
8 anos	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria		Não
	Aveia-preta (todos os anos)	Soja (todos os anos)	
Mais de 20 anos	Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo		Sim
	Aveia-preta/Azevém (2005)	Soja (2005-2006)	
	Aveia-preta /Azevém (2006)	Milho (2006-2007)	
	Aveia-preta /Azevém (2007)	Soja (2007-2008)	
	Aveia-preta /Azevém (2008)	Soja (2008-2009)	
Pelo menos 3 anos	Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff		Não
	Aveia-preta (2008)	Milho (2007-2008)	
	Trigo (2009)	Soja (2008-2009) Soja (2009-2010)	
Mais de 10 anos	Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque		Não
	Trigo (2007)	Soja (2007-2008)	
	Trigo (2008)	Milho (2008-2009)	
	Nabo forrageiro/Trigo (2009)	Soja (2009-2010)	

¹Informações disponibilizadas pelos produtores.



Figura 2 – Amostragem realizada em maio de 2010.

4.2 Caracterização física e matéria orgânica do solo

Foram realizadas determinações de granulometria, limites de liquidez e plasticidade, índice de plasticidade (EMBRAPA, 1997) e densidade de partículas (Dp) (GUBIANI et al., 2006), enquanto que o teor de carbono orgânico total (COT) foi determinado em um autoanalisador elementar modelo Flash 1112, sendo, após multiplicado por 1,724, a fim de estimar o teor de matéria orgânica do solo (MOS). Foi considerado o valor de 58% a participação do COT na composição da MOS (EMBRAPA, 1999). A caracterização detalhada dos solos analisados, juntamente com a umidade volumétrica (Uv) na tensão de 10 e 33 kPa, é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Teor de areia, silte e argila, densidade de partículas (Dp), matéria orgânica do solo (MOS), limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) e umidade volumétrica (Uv) em amostras equilibradas nas tensões de 10 kPa (Uv10 kPa) e 33 kPa (Uv33 kPa) dos solos estudados.

Prof ¹ m	Areia g kg ⁻¹	Silte g kg ⁻¹	Argila g kg ⁻¹	MOS %	Dp g cm ⁻³	LL kg kg ⁻¹	LP kg kg ⁻¹	IP kg kg ⁻¹	Uv10 kPa m ³ m ⁻³	Uv33 kPa m ³ m ⁻³
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria										
Ponto 1										
0 - 0,075	522	371	107	1,91	2,40	0,214	0,185	0,029	0,26	0,16
0,075- 0,15	532	339	129	1,43	2,42	0,199	0,174	0,025	0,24	0,15
Ponto 2										
0 - 0,075	547	375	78	3,29	2,38	0,258	0,236	0,023	0,31	0,19
0,075- 0,15	517	349	134	1,59	2,44	0,210	0,176	0,034	0,24	0,16
Ponto 3										
0 - 0,075	512	407	81	2,22	2,41	0,227	nc ²	nc	0,25	0,17
0,075- 0,15	549	347	104	1,67	2,41	0,194	0,177	0,017	0,27	0,15
Latossolo Vermelho Distrofico típico - Passo Fundo										
Ponto 1										
0 - 0,075	577	150	273	3,19	2,44	0,285	0,229	0,055	0,30	0,23
0,075- 0,15	561	141	298	2,55	2,46	0,284	0,229	0,055	0,30	0,24
Ponto 2										
0 - 0,075	736	90	174	1,88	2,47	0,194	0,181	0,013	0,23	0,15
0,075- 0,15	731	79	190	1,50	2,48	0,193	0,168	0,026	0,22	0,17

Tabela 2 – continuação...

Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff										
Ponto 3										
0 - 0,075	660	129	211	2,74	2,42	0,245	0,207	0,038	0,26	0,18
0,075- 0,15	656	122	222	2,19	2,42	0,239	0,195	0,044	0,25	0,18
Ponto 4										
0 - 0,075	506	206	288	3,19	2,47	0,295	0,241	0,054	0,30	0,22
0,075- 0,15	495	200	305	2,50	2,45	0,292	0,236	0,056	0,29	0,24
Ponto 5										
0 - 0,075	697	122	181	2,60	2,49	0,241	0,199	0,042	0,23	0,19
0,075- 0,15	687	98	215	1,70	2,53	0,216	0,175	0,041	0,25	0,18
Ponto 6										
0 - 0,075	550	200	250	3,29	2,41	0,279	0,241	0,038	0,27	0,23
0,075- 0,15	531	181	288	2,43	2,44	0,268	0,215	0,054	0,28	0,22
Latossolo Vermelho Distroférico típico – Não-Me-Toque										
Ponto 1										
0 - 0,075	310	333	357	3,45	2,57	0,306	0,270	0,036	0,29	0,26
0,075- 0,15	291	293	416	2,71	2,65	0,312	0,233	0,080	0,32	0,29
Ponto 2										
0 - 0,075	365	274	361	3,52	2,56	0,339	0,274	0,065	0,43	0,31
0,075- 0,15	340	237	423	2,26	2,58	0,342	0,266	0,076	0,35	0,34
Ponto 3										
0 - 0,075	135	405	460	4,10	2,63	0,390	0,319	0,071	0,40	0,33
0,075- 0,15	127	388	485	4,15	2,71	0,414	0,317	0,097	0,40	0,33
Ponto 4										
0 - 0,075	134	365	501	3,86	2,62	0,435	0,378	0,057	0,44	0,40
0,075- 0,15	134	348	518	3,02	2,62	0,619	0,419	0,200	0,53	0,50
Ponto 5										
0 - 0,075	174	355	471	4,26	2,56	nd ³	nd	Nd	0,38	0,33
0,075- 0,15	163	347	490	3,76	2,57	0,433	0,291	0,142	0,41	0,38
Ponto 6										
0 - 0,075	152	376	472	4,40	2,56	0,385	0,311	0,074	0,40	0,34
0,075- 0,15	146	350	504	3,58	2,55	0,387	0,311	0,077	0,37	0,33
Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque										
Ponto 1										
0 - 0,075	197	229	574	3,55	2,50	0,377	0,316	0,061	0,42	0,38
0,075- 0,15	147	116	737	2,26	2,52	0,426	0,356	0,071	0,44	0,42
Ponto 2										
0 - 0,075	337	261	402	3,14	2,44	0,323	0,240	0,084	0,32	0,27
0,075- 0,15	335	218	447	2,76	2,48	0,317	0,239	0,078	0,32	0,27
Ponto 3										
0 - 0,075	403	260	337	4,48	2,44	0,320	0,259	0,061	0,39	0,35
0,075- 0,15	387	237	376	3,36	2,52	0,313	0,246	0,067	0,35	0,32

¹ profundidade; ² não coeso; ³ não determinado.

4.3 Propriedades físico-hídricas

A densidade do solo (D_s), a porosidade total (P_t), o índice de vazios (I_v) e a umidade volumétrica (U_v) foram determinados conforme Embrapa (1997). A porosidade de aeração (E_a) foi calculada como a diferença entre o conteúdo de água e a porosidade total da amostra. O índice de continuidade de poros (K_1), proposto por Groenevelt et al. (1984), foi calculado como:

$$K_1 = \frac{K_a}{E_a} \quad (1)$$

em que K_1 é a índice de continuidade de poros (μm^2), K_a é a permeabilidade do solo ao ar (μm^2) e E_a é a porosidade de aeração ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

4.4 Estimativa do conteúdo de água do solo

Com a finalidade de avaliar a influência da umidade na capacidade de suporte de carga e na suscetibilidade à compactação ao longo de um cultivo agrícola, obteve-se uma estimativa da umidade do solo por meio do balanço hídrico seqüencial, conforme metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1955), descrita em Pereira et al., (1007) e utilizada por Gubiani (2012).

Nessa metodologia, a quantidade de água armazenada numa camada de solo (L), em que os limites são a superfície e a profundidade efetiva do sistema radicular (Z_e), considerando um determinado período ($i=t_2-t_1$) (que neste trabalho é um dia) de entradas e saídas de água, pode ser representada pela equação:

$$\Delta A = P + I + E_{Se} + D_{Le} + AC - E_{Ss} - ET - DP - DLs \quad (2)$$

em que ΔA é a variação no armazenamento, P é a precipitação, I é a irrigação, E_{Se} e E_{Ss} são, respectivamente, os escoamentos superficial de entrada e saída, D_{Le} e

DLs são, respectivamente, a drenagem lateral subsuperficial de entrada e saída, AC é a ascensão capilar, DP é a drenagem profunda e ET é a evapotranspiração. Todos os termos da equação supracitada são expressos em milímetros (mm).

Considerando que foram avaliados apenas pontos dentro das áreas comerciais (Tabela 2) e não parcelas experimentais ou áreas maiores, os termos DLe e DLs foram desconsiderados na quantificação da variação do armazenamento da água no solo. O termo AC, em função da pequena magnitude em relação aos demais termos da equação 3, também foi desconsiderado, situação semelhante para o termo I, pelo fato de não haver irrigação nas áreas monitoradas. Dessa forma, o cálculo do balanço hídrico neste estudo se resume em:

$$\Delta A = P + E_{Se} - E_{Ss} - ET - DP \quad (3)$$

Na metodologia, a profundidade efetiva do sistema radicular (Z_e) é considerada constante. Também, assumiu-se que toda a P é integralmente alocada no perfil do solo até o máximo armazenamento, enquanto que o excedente integra o balanço dos componentes E_{Se} e E_{Ss} mais a DP, contabilizados, portanto, de forma não explícita. O armazenamento varia no intervalo da capacidade de água disponível (CAD), definida pela diferença entre o conteúdo de água na capacidade de campo (U_{VCC}) e no ponto de murcha permanente (U_{VPMP}), multiplicada por Z_e :

$$CAD = (U_{VCC} - U_{VPMP}) \times Z_e \quad (4)$$

O U_{VCC} foi definido como o conteúdo de água na tensão de 10 kPa e o U_{VPMP} foi definido como o conteúdo de água na tensão de 1500 kPa.

4.4.1 Crescimento do sistema radicular

A profundidade efetiva do sistema radicular (Z_e) foi simulada com a curva de crescimento sigmoideal proposta por Dourado-Neto et al. (1999):

$$Z_{e_i} = Z_{e_{ini}} + [(Z_{e_{max}} - Z_{e_{ini}})/2] \times [1 - \cos((\pi^{1/F} \times d/DAS)^F)] \quad (5)$$

em que Z_{e_i} é a profundidade efetiva do sistema radicular no i -ésimo dia após a semeadura (mm), $Z_{e_{ini}}$ é a profundidade inicial do sistema radicular (mm), $Z_{e_{max}}$ é a profundidade máxima do sistema radicular (mm), d é o dia da semeadura, DAS é o número de dias depois da semeadura em que o $Z_{e_{max}}$ é alcançado e F é o fator de forma da curva de crescimento. Foram realizadas medidas do crescimento radicular até o início do florescimento da soja. Foi considerado o fator de forma “F” de 0,994.

4.4.2 Evapotranspiração

A evapotranspiração máxima (ET_m , mm dia⁻¹) foi calculada, diariamente, segundo metodologia proposta por Allen et al. (1998), a qual relaciona a evapotranspiração de referência (ET_o , mm dia⁻¹) com os coeficientes de cultura (K_c):

$$ET_m = ET_o (K_c) \quad (6)$$

A ET_o (mm dia⁻¹) foi calculada pelo método de Penman-Monteith, o qual inclui o efeito do balanço de energia e o efeito aerodinâmico:

$$ET_o = \frac{s}{s + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma 900}{(s + \gamma^*)(T_m + 275)} U_2 (e_a - e_s) \quad (7)$$

em que s é a tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água para a temperatura média diária T_m (kPa °C⁻¹), γ é a constante psicrométrica (0,06356 kPa °C⁻¹), γ^* é a constante psicrométrica corrigida, λ é o calor latente de evaporação (2,46 MJ kg⁻¹), R_n é o saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹), U_2 é a velocidade média do vento a 2 m de altura (m s⁻¹); e_a é a pressão parcial de vapor do ar (kPa) e e_s é a pressão de vapor de saturação do ar (kPa).

As variáveis citadas na equação 7 foram calculadas conforme segue:

$$e_s = 0,6108 \text{EXP} \left(\frac{17,27 T_m}{T_m + 237,3} \right) \quad (8)$$

$$e_a = e_s \frac{UR}{100} \quad (9)$$

em que UR é a umidade relativa do ar (%);

$$s = \frac{4098 e_s}{(T_m + 237,3)^2} \quad (10)$$

$$\gamma^* = 0,06356(1 + 0,33U_2) \quad (11)$$

Os dados meteorológicos foram obtidos de estações meteorológicas automáticas no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas nos municípios de Santa Maria e Passo Fundo, próximas das áreas avaliadas no PVAd e LVd, e de uma estação meteorológica automática da Cotrijal Cooperativa Agropecuária e Industrial, localizada no município de Victor Graeff e próxima do LVdf-NMT e LVdf-VG. Foram obtidas informações de dados médios diários de temperatura (T_m , °C), velocidade do vento (U_2 , m s^{-1}), umidade relativa do ar (UR, %), radiação global incidente (R_{inc} , MJ m^{-2}). Os dados de precipitação (P, mm) foram obtidos diariamente através de pluviômetros instalados nas áreas avaliadas. Maiores informações são apresentadas nas Figuras 3, 4 e 5.

Para o cálculo da ET_m é necessário o conhecimento dos valores dos coeficientes de cultura (K_c), os quais foram estimados a partir de K_c obtido na literatura (FARIAS et al., 2001). Foram considerados os seguintes valores de K_c por período fenológico: 0,56 para o período compreendido entre a semeadura e a primeira folha trifoliolada completamente desenvolvida (S – V2), 1,50 para o período compreendido entre o início do florescimento e o início do enchimento de grãos (R1 – R5) e 0,9 quando da maturação plena (R8). Nos períodos S – V2 e R1 – R5 os valores de K_c foram considerados constantes, enquanto que nos períodos V2 – R1 e R5 – R8 (0,9) os valores de K_c foram estimados por interpolação linear.

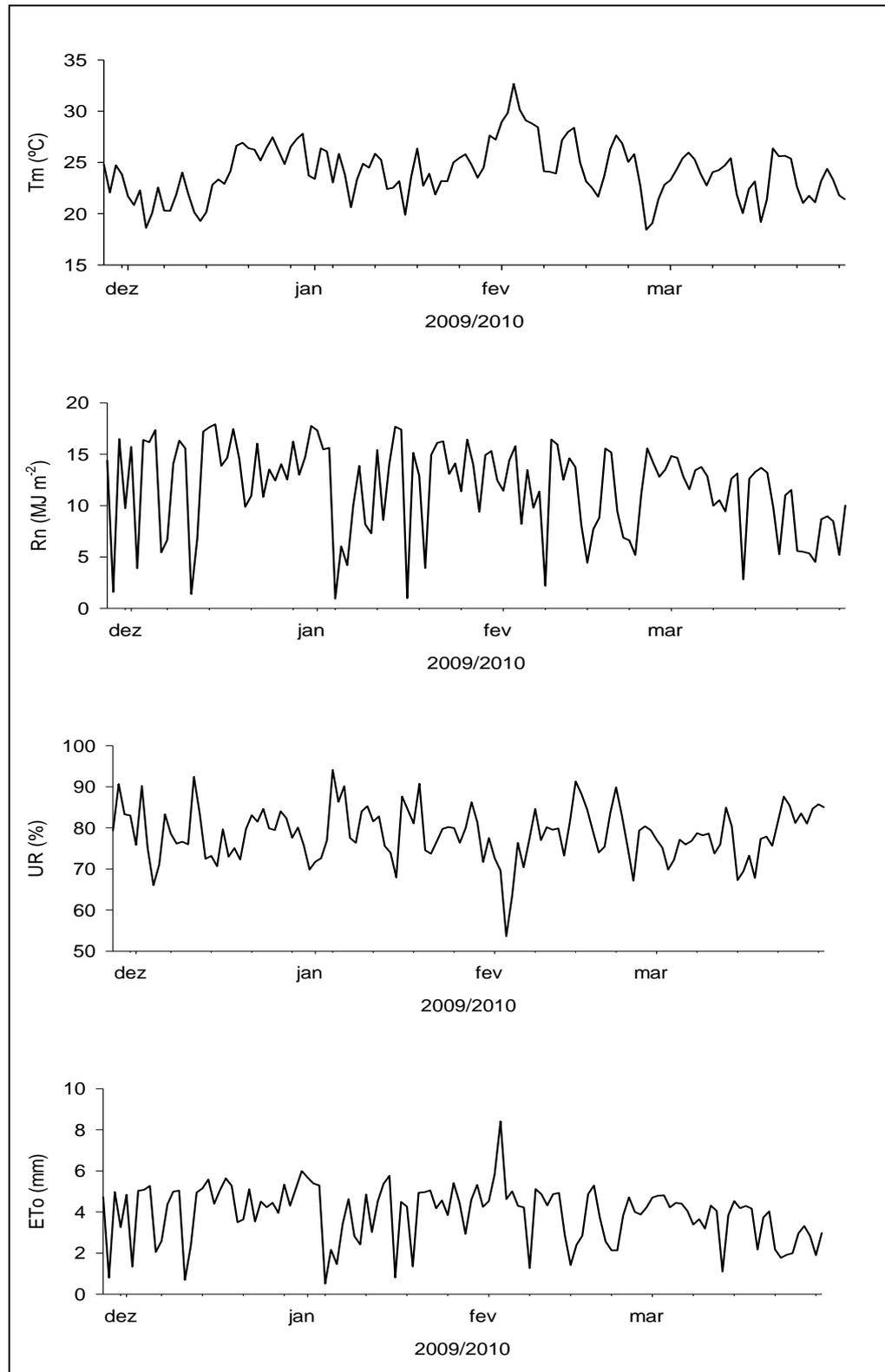


Figura 3 – Valores diários das variáveis meteorológicas temperatura média do ar (T_m), saldo de radiação (R_n), umidade relativa do ar (UR) e evapotranspiração de referência (ET_o) durante o período de cultivo no PVAd, localizado em Santa Maria/RS.

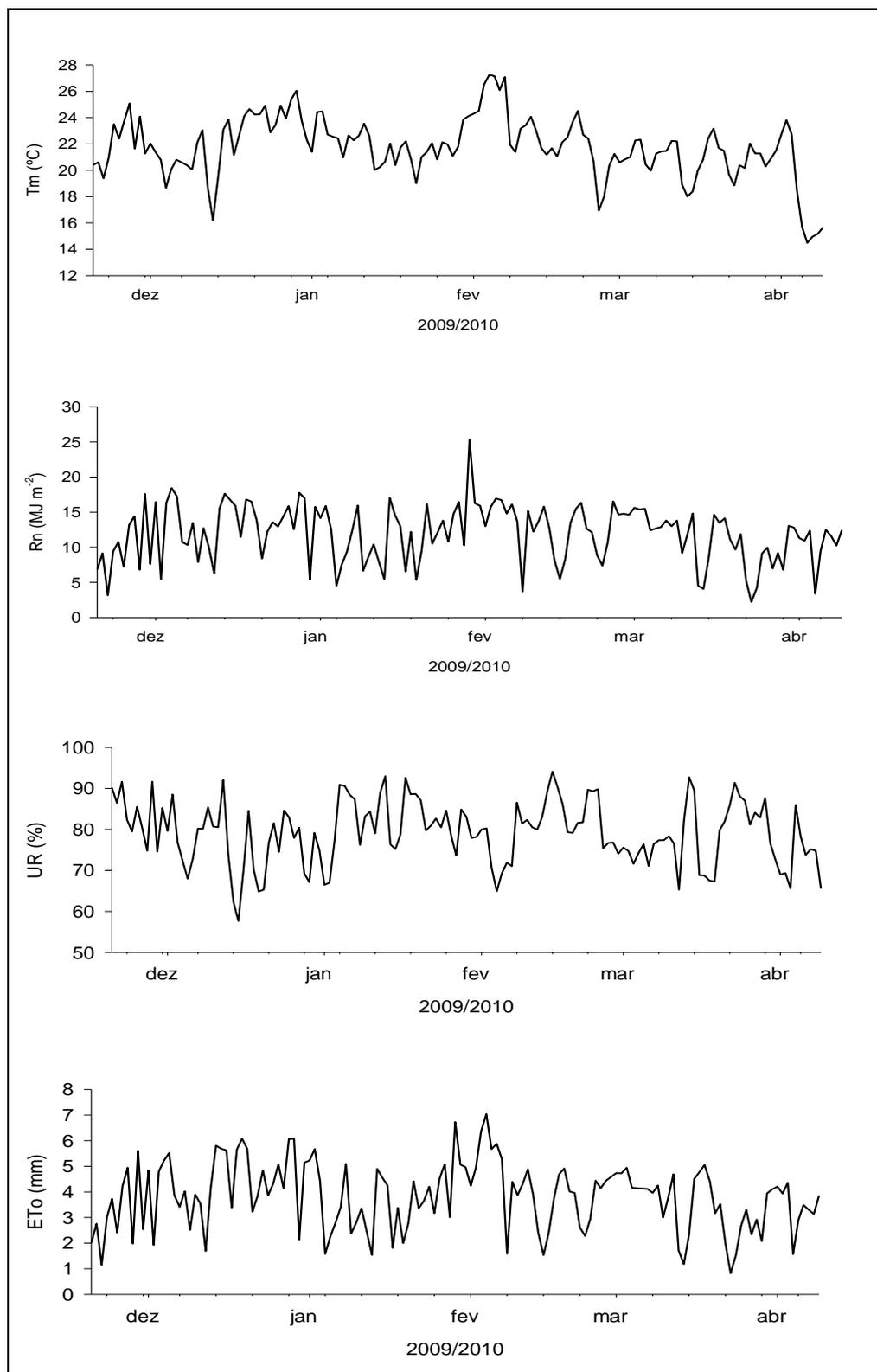


Figura 4 – Valores diários das variáveis meteorológicas temperatura média do ar (T_m), saldo de radiação (R_n), umidade relativa do ar (UR) e evapotranspiração de referência (ET_o) durante o período de cultivo no LVd, localizado em Passo Fundo/RS.

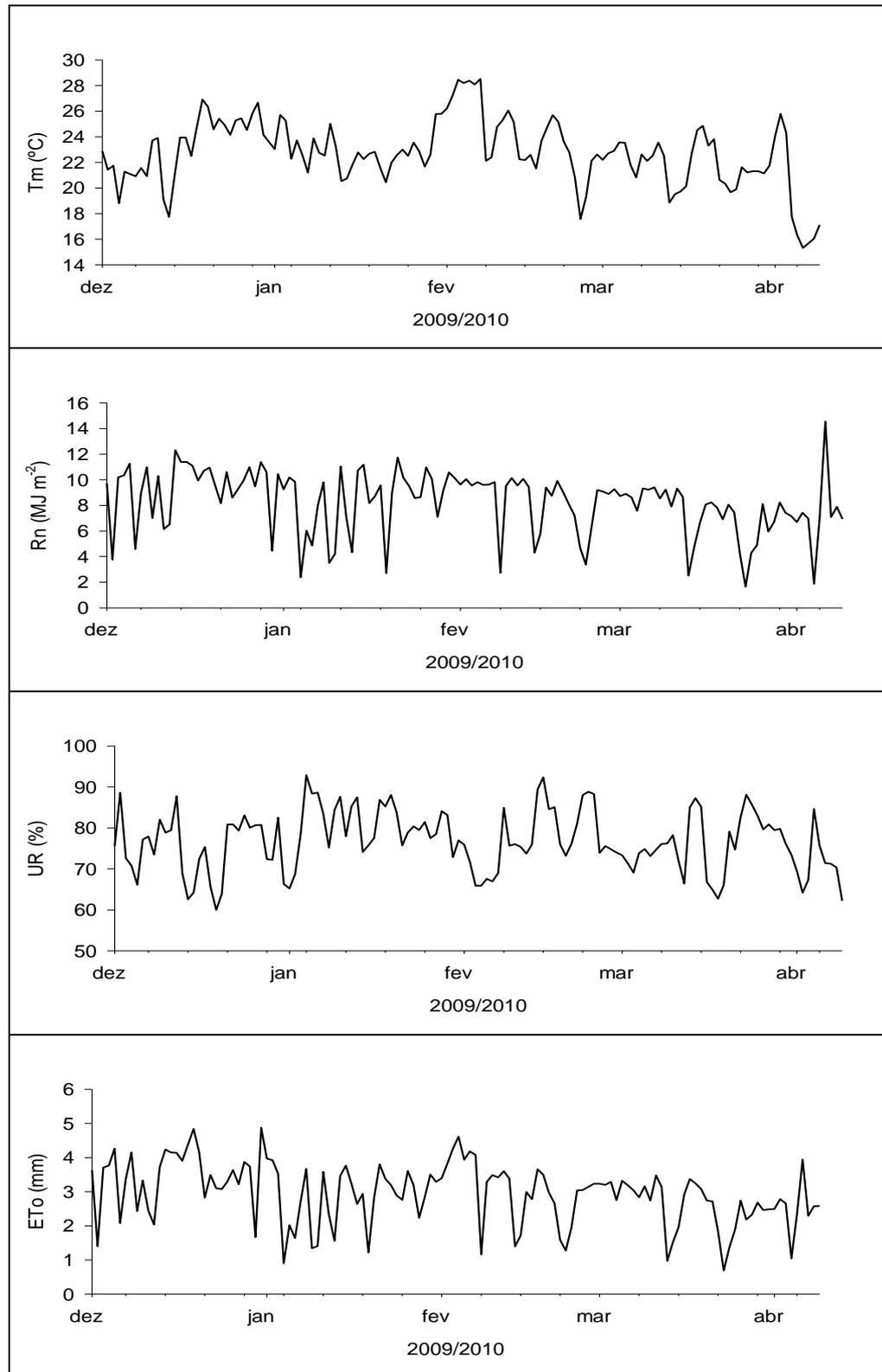


Figura 5 – Valores diários das variáveis meteorológicas temperatura média do ar (T_m), saldo de radiação (R_n), umidade relativa do ar (UR) e evapotranspiração de referência (E_{To}) durante o período de cultivo no LVdf-VG e LVdf-NMT, localizados, respectivamente, em Victor Graeff/RS e Não-Me-Toque/RS.

Com o propósito de melhor estabelecer os limites de cada período do Kc, também foram considerados os valores de índice de área foliar (IAF) que foram medidos ao longo do ciclo de desenvolvimento da soja. Para tanto, foram realizadas medições do comprimento e largura do folíolo central do trifólio. De posse de tais informações, foram ajustadas equações lineares para a estimativa da área total do trifólio. A área total do trifólio para o ajuste das equações foi determinada com o auxílio do software AreaMed (GUBIANI et al., 2009). Maiores detalhes destas equações constam na Tabela 3. Pela relação entre a área total de trifólios (cm²) de cada planta e a superfície do solo que ela ocupava (100.000.000 cm²/população de plantas), calculou-se o IAF. Na Figura 6 é apresentado, como exemplo da estratégia adotada, a variação do IAF e do Kc para o solo LVd (ponto 2).

Tabela 3 – Equações lineares ajustadas em função da largura (L) e comprimento (C) do folíolo central dos trifólios, para a estimativa da área total do trifólio (AT_{trifólio}) da soja nos solos em estudo. R²: coeficiente de determinação; N: tamanho da amostra.

Solo	Equação linear ajustada	R ²	N
AT_{trifólio} (cm²) = a + b(L x C)			
PVAd	AT _{trifólio} = -7,7705 + 2,2864(L x C)	0,948	84
LVd ¹	AT _{trifólio} = 0,1672 + 1,9237(L x C)	0,986	96
LVd ²	AT _{trifólio} = -3,1356 + 2,0767(L x C)	0,985	91
LVdf-VG	AT _{trifólio} = -9,4761 + 2,3071(L x C)	0,969	88
LVdf-NMT	AT _{trifólio} = -7,3533 + 2,1855(L x C)	0,981	61

¹ pontos 1, 2, 4 e 6; ² pontos 3 e 5;

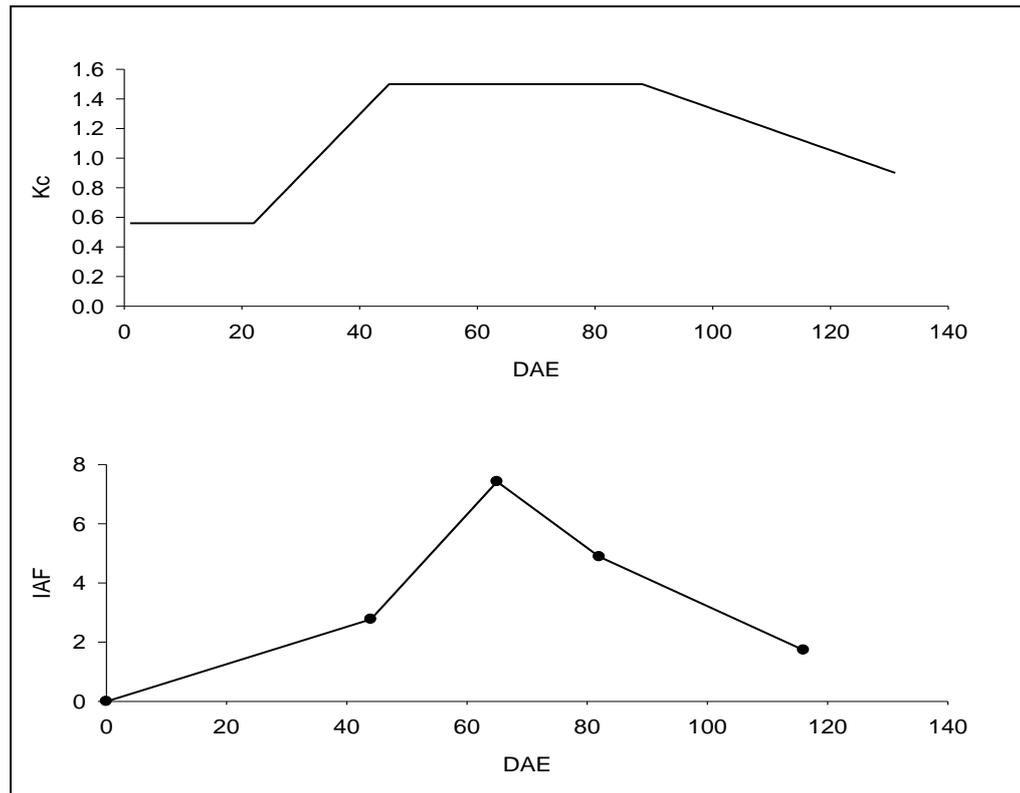


Figura 6 – Valores diários do coeficiente de cultura (kc) e do índice de área foliar (IAF) para o LVd (ponto 2).

4.4.3 Armazenamento

No cálculo do balanço hídrico realizado nesse estudo assumiu-se que a entrada de água via precipitação pode ser totalmente alocada no perfil do solo até seu armazenamento máximo, enquanto que as saídas por evapotranspiração são controladas pelo solo, ou seja, o negativo acumulado (NAC), definido como a diferença entre P e ET_m (quando a precipitação efetiva for menor que a ET_m), não é integralmente removido do solo (THORNTHWAITE; MATHER, 1955). Dessa forma, o armazenamento decresce exponencialmente com o NAC. Quando P_i foi menor ou igual a ET_{m_i} , o negativo acumulado e o armazenamento foram calculados segundo as equações:

$$NAC_i = NAC_{i-1} + (P_i - ET_{m_i}) \quad (12)$$

$$ARMZ_i = CAD_i \exp\left(\frac{NAC_i}{CAD_i}\right) \quad (13)$$

Quando a P_i foi maior que a ETm_i , a parcela de P_i restante, depois de subtraída da ETm_i , era totalmente alocada no perfil:

$$ARMZ_i = ARMZ_{i-1} + (P_i - ETm_i) \quad (14)$$

A equação 14 é restrita à condição em que a CAD_i é maior ou igual ao $ARMZ_i$. Então, o NAC_i é recalculado:

$$NAC_i = CAD_i \ln\left(\frac{ARMZ_i}{CAD_i}\right) \quad (15)$$

O uso das equações 12 a 15 considera uma CAD constante. No entanto, para esse trabalho, o CAD aumentou diariamente. A parcela diária de aumento da CAD foi acrescentada no armazenamento e o $ARMZ_i$ foi recalculado:

$$ARMZ_i = ARMZ_{i-1} + (CAD_i - CAD_{i-1}) \quad (16)$$

Após a aplicação da equação 16, o NAC foi recalculado (equação 15). Para o próximo dia, os cálculos recomeçavam a partir da equação 12 ou 15, dependendo da relação entre P_i e ETm_i .

A evapotranspiração real diária (ETr_i) foi calculada conforme as equações a seguir:

$$ETr_i = ETm_i, \text{ se } P_i \text{ era maior ou igual a } ETm_i \quad (17)$$

$$ETr_i = P_i + |ARMZ_i - ARMZ_{i-1}|, \text{ se } P_i \text{ era menor que a } ETm_i \quad (18)$$

O excedente hídrico (EXC) foi calculado como:

$$EXC_i = 0, \text{ se o } ARMZ_i \text{ era menor que a } CAD_i \quad (19)$$

$$EXC_i = (P_i - ETm_i) - (ARMZ_i - ARMZ_{i-1}), \text{ se o } ARMZ_i \text{ era igual ou superior a } CAD_i \quad (20)$$

Por fim, a umidade volumétrica (U_v) na camada ocupada pelas raízes foi calculada pela soma do armazenamento convertido em base volumétrica ao limite inferior da CAD:

$$U_v = (ARMZ_i / Z_{e_i}) + U_{v_{1500kPa}} \quad (21)$$

Com o propósito de ilustrar a metodologia acima descrita, na Figura 7 são apresentados os valores da capacidade de água disponível (CAD), a evapotranspiração real (ETr), a precipitação (P) e o armazenamento (ARMZ) ao longo do ciclo de cultivo no PVAd (ponto 1). Importante informar que todos os cálculos foram efetuados em planilha Excel®, sendo a maioria estruturada em algoritmos escritos em VBA (Visual Basic Application), programados pelo professor Paulo Ivonir Gubiani (informações não publicadas).

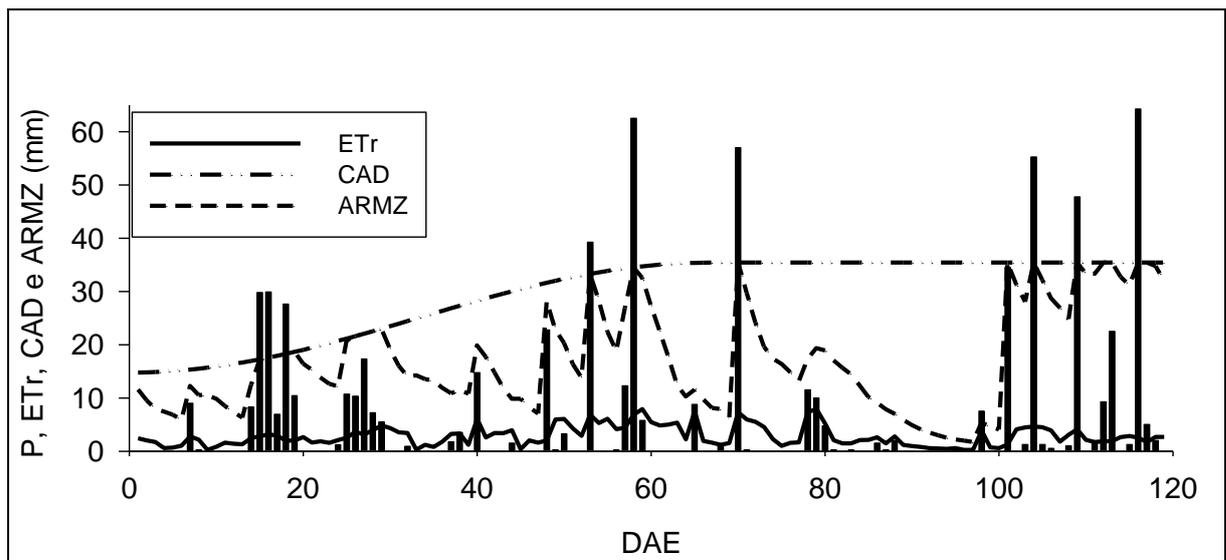


Figura 7 – Precipitação (P) (colunas), evapotranspiração real (ETr), capacidade de água disponível (CAD) e armazenamento da água no solo (ARMZ) para um dos cálculos do balanço hídrico realizado para o cultivo de soja em um PVAd (ponto 1), localizado no município de Santa Maria/RS. DAE= dias após emergência.

4.5 Condução da cultura da soja

Como apresentado na Tabela 1, foram avaliadas quatro áreas comerciais destinadas ao cultivo da soja. Não foram realizadas interferências no manejo realizado nas lavouras, sendo que o manejo do solo, utilização de máquinas e implementos agrícolas, adubação, tratamentos fitossanitários e colheitas foram realizados a critério dos produtores. Maiores Informações da condução da lavoura de soja e características da planta que podem afetar o balanço hídrico do solo estão apresentados na Tabela 4, enquanto que informações dos valores médios de D_s , umidade volumétrica em solo saturado ($U_{V_{SAT}}$), $U_{V_{CC}}$ e $U_{V_{PMP}}$ para as camadas consideradas no balanço hídrico (considerando a $Z_{e_{max}}$) são apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 – Datas de semeadura, emergência e colheita, duração do ciclo, cultivar, hábito de crescimento, população de plantas, profundidade inicial ($Z_{e_{ini}}$) e máxima ($Z_{e_{max}}$) do sistema radicular e índice foliar máximo (IAF_{max}) realizadas e/ou observadas nos solos avaliados.

Pontos	Semeadura	Emergência,	Colheita	Ciclo dias	Cultivar	Habito de Crescimento	População (plantas/ha)	$Z_{e_{ini}}$ ----mm----	$Z_{e_{max}}$	IAF_{max}
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico - Santa Maria										
1									180	13,2
2	27/11/2009	03/12/2009	28/3/2010	116	BMX Tittan RR	indeterminado	240.000	75	200	9,75
3									220	11,15
Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo										
1									330	8,11
2	20/11/2009	30/11/2009	09/4/2011	131	CD 231 RR		233.000		200	7,42
3			25/3/2010	116	BMX Impacto RR	determinado	350.000	75	240	7,92
4	23/11/2009	3/12/2009	09/4/2010	128	CD 231 RR		233.000		220	7,68
5	20/11/2009	30/11/2009	25/3/2010	116	BMX Impacto RR		350.000		200	6,7
6	23/11/2009	3/12/2009	09/4/2010	128	CD 231 RR		233.000		220	6,15
Latossolo Vermelho Distroférico típico - Victor Graeff										
1									200	5,59
2									170	4,04
3									200	5,96
4	01/12/2009	06/12/2009	26/3/2010	111	BMX Apolo RR	indeterminado	215.000	75	145	3,7
5									120	4,35
6									150	4,04
Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque										
1									120	4,25
2	19/12/2009	24/12/2009	9/4/2010	107	BMX Magna RR	indeterminado	200.000	75	250	4,03
3									250	5,99

Tabela 5 – Valores médios de densidade do solo (D_s), umidade volumétrica do solo saturado (U_{vSAT}), na capacidade de campo (U_{vCC}) e no ponto de murcha permanente (U_{vPMP}) das camadas em que foram realizados os cálculos do balanço hídrico do solo, considerando a profundidade máxima do sistema radicular (Tabela 4).

Pontos	D_s ($Mg\ m^{-3}$)	U_{vSAT}	U_{vCC}	U_{vPMP}
		----- $m^3\ m^{-3}$ -----		
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico - Santa Maria				
1	1,58	0,367	0,279	0,082
2	1,57	0,358	0,294	0,077
3	1,61	0,349	0,286	0,069
Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo				
1	1,48	0,413	0,327	0,123
2	1,59	0,358	0,247	0,131
3	1,55	0,380	0,284	0,124
4	1,46	0,423	0,319	0,154
5	1,56	0,368	0,276	0,113
6	1,47	0,414	0,313	0,140
Latossolo Vermelho Distroférrico típico - Victor Graeff				
1	1,39	0,463	0,358	0,205
2	1,37	0,467	0,391	0,222
3	1,31	0,499	0,393	0,210
4	1,14	0,554	0,408	0,295
5	1,34	0,492	0,404	0,220
6	1,22	0,521	0,387	0,225
Latossolo Vermelho Distroférrico típico - Não-Me-Toque				
1	1,28	0,496	0,424	0,208
2	1,36	0,458	0,371	0,186
3	1,37	0,454	0,363	0,178

4.6 Ensaio de compressão uniaxial

O comportamento compressivo e elástico do solo foi avaliado em amostras obtidas com anéis de aço inoxidável de 0,061 m de diâmetro de 0,03 m de altura. Em laboratório, as amostras foram saturadas por capilaridade durante 24 horas e, em seguida, equilibradas em quatro diferentes tensões, o que possibilitou uma variação na U_v . Em uma coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006), foram aplicadas as tensões de 6 e 10 kPa, enquanto que em câmaras de pressão de Richards (KLUTE, 1986), tensões de 33 e 100 kPa. Foram coletadas duas repetições para cada ponto, profundidade e tensão de água avaliada.

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado em um consolidômetro, modelo S-450 Terraload (Durham Geo-Interprises), sendo aplicadas cargas sucessivas e estáticas durante cinco minutos, período suficiente para atingir 99 % da deformação máxima (SILVA et al., 2000). O ensaio consistiu em três etapas. Primeiramente foi efetuado o *carregamento*, com aplicação de cargas de 12,5, 25, 50, 100, 200 e 400 kPa. Após, efetuou-se o *descarregamento* sequencial das cargas, retornando até 12,5 kPa e, em seguida, um novo *recarregamento*, aplicando-se as cargas de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa. Ao final do ensaio, as amostras foram secas em estufa a 105 °C até atingirem peso constante para determinação da D_s , I_v e U_v .

Os parâmetros de elasticidade do solo foram determinados com o conjunto de deformações provenientes das cargas de 400 kPa do *carregamento*, das cargas do *descarregamento* e das cargas do *recarregamento* (até 400 kPa) (BRAIDA et al., 2008). A elasticidade é expressa pelo coeficiente de descompressão (C_d), que corresponde tangente do ângulo da reta ajustada aos dados de *descarregamento* e *recarregamento* (considerando neste caso a carga de 400 kPa como valor inicial do *descarregamento*) e pelo índice de recuperação (I_r), que corresponde a relação entre a variação do índice de vazios durante o *descarregamento* (ΔI_{vD}) e a variação do índice de vazios durante o *carregamento* (ΔI_{vC}). Maiores detalhes são apresentados na Figura 1.

A pressão de preconsolidação (σ_p) e o índice de compressão (I_c) foram determinados com as deformações decorrentes das cargas aplicadas durante o *carregamento* e das cargas de 800 e 1600 kPa do *recarregamento*. Para o conjunto de dados (σ , I_v) de cada amostra ajustou-se o modelo matemático de van Genuchten (1980), adaptado para as variáveis do ensaio de compressão:

$$I_v = I_{vf} + (I_{vi} - I_{vf})[1 + (\alpha\sigma)^n]^{-(1-1/n)} \quad (22)$$

em que σ é a carga aplicada, I_{vi} é o índice de vazios inicial (para $\sigma = 0$), I_{vf} é o índice de vazios final e α e n são os parâmetros de ajuste. Para o ajuste do modelo, foi utilizado o método não linear de Gauss-Newton implementado no SAS (SAS INSTITUTE, 1999).

A σ_p e o I_c foram definidos de acordo com o método de Casagrande, descrito em Holtz e Kovacs (1981), aplicado por procedimentos numéricos. A reta virgem foi definida pela reta tangente ao ponto de inflexão da curva de compressão

ajustada (GREGORY et al., 2006) e a σ_p estimada pelo valor de σ na intersecção da reta virgem com a reta bissetriz. O ponto de máxima curvatura (PMC), ou seja, a origem da bissetriz, foi definido como o maior valor da curvatura (GREGORY et al., 2006):

$$PMC = l d^2 l v / d \sigma^2 l / [1 + (d l v / d \sigma)^2]^{3/2} \quad (23)$$

em que $d l v / d \sigma$ e $d^2 l v / d^2 \sigma$ são a primeira e a segunda derivadas do modelo ajustado (equação 22), respectivamente, sendo o PMC coincidente com o ponto de mínimo da segunda derivada da curva de compressão (ARVIDSSON; KELLER, 2004). Os cálculos foram efetuados com um algoritmo desenvolvido em *Visual Basic for Applications* em Excel® (Paulo Ivonir Gubiani, informações não publicadas).

4.7 Permeabilidade do solo ao ar

A permeabilidade do solo ao ar (K_a) foi avaliada em amostras com estrutura preservada obtidas com anéis de aço inoxidável de 0,057 m de diâmetro de 0,04 m de altura. . Em laboratório, as amostras foram saturadas por capilaridade durante 24 horas e, em seguida, equilibradas em nove diferentes tensões (cada amostra foi equilibrada em somente uma tensão para posterior determinação da K_a), o que possibilitou uma variação na umidade volumétrica (U_v). Em uma coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006) foram aplicadas as tensões de 1, 3, 6 e 10 kPa, enquanto que em câmaras de pressão de Richards (KLUTE, 1986), tensões de 33, 50, 100, 300 e 500 kPa.

Após o equilíbrio das amostras na tensão pretendida, a medição da permeabilidade do solo ao ar foi realizada com o auxílio de um permeâmetro de carga constante. O equipamento é composto por fluxímetros com diferentes vazões, através dos quais o ar flui antes de passar pelo solo. O ar é aplicado a baixa pressão (0,1 kPa) e de forma constante, para que se evite o fluxo turbulento. O gradiente de pressão entre o ambiente e o ar que flui pela amostra é medido por um manômetro de água, e após, é calculada a condutividade ao ar, k_l (cm s^{-1}):

$$k_l = \rho_l g \frac{\Delta V l}{\Delta t \Delta p A} \quad (24)$$

em que k_l é a condutividade ao ar (cm s^{-1}), ρ_l é a densidade do ar no momento da medida (g cm^{-3}), g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ cm s}^{-2}$), ΔV é a quantidade de ar que passa pela amostra no Δt (cm^3), l é a altura da amostra (cm), Δp é a pressão do ar que passa pela amostra ($1 \text{ cm de coluna de água} = 1000 \text{ dinas cm}^{-2}$; $\text{dinas} = \text{g cm s}^{-2}$), A é a área superficial do anel (cm^2);

A partir da condutividade ao ar (k_l), calculou-se a permeabilidade ao ar, K_a (μm^2):

$$K_a = k_l \frac{\eta}{\rho_l g} \quad (25)$$

em que η é a viscosidade do ar ($\text{g s}^{-1} \text{ cm}^{-1}$), ρ_l é a densidade do ar no momento da medida (g cm^{-3}) e g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ cm s}^{-2}$).

4.8 Análise estatística

A relação entre as propriedades compressivas e a permeabilidade ao ar com as variáveis indicadoras da condição estrutural, a granulometria e teor de matéria orgânica e o conteúdo de água do solo foi avaliada por meio de análise de regressão linear, complementada pelo intervalo de confiança.

A normalidade de distribuição dos dados das propriedades físico-hídricas e da K_a foram avaliadas pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e, quando identificada a distribuição não-normal, os dados foram transformados para a escala logarítmica. Aos dados de K_a e K_1 , antes da transformação, foi adicionado o valor 1 ($K_a + 1$) ($K_1 + 1$), pela existência de valores nulos nos dados dessas variáveis. Todas as análises foram realizadas usando o pacote estatístico SAS (SAS INSTITUTE, 1999).

Na tentativa de identificar com maior clareza o efeito da D_s na K_a , optou-se em separar os valores de D_s em três faixas. Como estratégia, determinou-se os

valores mínimos (MIN), médios (MED) e máximos (MAX), além do desvio padrão (DP) para cada classe de solo e, de posse de tais informações, foram definidas as faixas de Ds: $Ds1 = MIN \leq Ds \leq (MED - 1 DP)$; $Ds2 = (MED - 1 DP) < DS \leq (MED + 1 DP)$; $Ds3 = (MED + 1 DP) < DS \leq MAX$.

4.8.1 Relação da pressão de preconsolidação e o índice de compressão com a densidade e o conteúdo de água no solo

A relação entre da σ_p e do I_c com as propriedades físico-hídricas foi avaliada por meio de análise de regressão linear complementada pelo intervalo de confiança. Após essas avaliações, o efeito conjunto da Ds e Uv na σ_p e no I_c foi estimado a partir de modificações dos modelos propostos por Imhoff et al. (2004) (Equações 26 e 27) e Busscher (1990) (Equações 28 e 29):

$$\sigma_p = a + b \times Ds + c \times Uv \quad (26)$$

$$I_c = d + e \times Ds + f \times Uv \quad (27)$$

$$\sigma_p = g \times Ds^h \times Uv^i \quad (28)$$

$$I_c = j \times Ds^k \times Uv^l \quad (29)$$

em que σ_p é a pressão de preconsolidação (kPa), I_c é o índice de compressão, Ds é a densidade do solo ($Mg \ m^{-3}$), Uv é a umidade volumétrica ($m^3 \ m^{-3}$) e $a, b, c, d, e, f, g, h, i, k, k$ e l são coeficientes de ajuste dos modelos.

O modelo de Busscher (BUSSCHER, 1990) tem sido largamente utilizado nos estudos de modelagem da resistência do solo à penetração (RP) em função da Ds e Uv. Contudo, seu uso também é válido na modelagem de propriedades compressivas do solo, principalmente na estimativa da σ_p , uma vez que estudos têm demonstrado boa relação entre as duas propriedades (DIAS JUNIOR et al., 2004;

SUZUKI et al., 2008). Todas as análises foram realizadas usando o pacote estatístico SAS (SAS INSTITUTE, 1999).

4.8.2 Relação entre permeabilidade ao ar e porosidade de aeração

Conforme proposto por Ball et al. (1988), a K_a e E_a foram relacionadas por uma transformação logarítmica análoga ao modelo exponencial proposto por Ahuja et al. (1984), como segue:

$$\log K_a = \log M + N \log E_a \quad (30)$$

em que M e N são constantes empíricas. Para esses autores, N é considerado um índice de continuidade de poros, que reflete o incremento de K_a com o aumento da E_a ou redução na tortuosidade de poros e área superficial com maior quantidade de poros disponíveis para o fluxo.

Ball et al. (1988) também propuseram uma estimativa da porosidade de aeração bloqueada (E_b), derivada da equação 30:

$$E_b = 10^{(-\log M/N)} \quad (31)$$

em que E_b é o valor de E_a abaixo do qual o fluxo de ar através do solo cessa devido à descontinuidade na rede de poros de aeração.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Elasticidade do solo

A aplicação de diferentes tensões nas amostras antes da realização dos ensaios de compressão uniaxial ocasionou uma ampla variação no conteúdo de água do solo (Tabelas 2 e 6). Portanto, o efeito da umidade na elasticidade do solo foi avaliado em amostras no estado de consistência plástica (suscetível à compactação), friável (adequada para as práticas de manejo do solo) e próximo à consistência tenaz (solo mais resistente a deformações, devido à elevada atração entre as moléculas sólidas) (REICHERT et al., 2010). Para essa variável, os coeficientes de variação (CV) oscilaram entre 15,21% (LVdf-NMT) e 26,34% (PVAd).

Tabela 6 - Valor mínimo, médio e máximo, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) da densidade do solo (Ds), índice de vazios (Iv) e umidade volumétrica (Uv) dos solos avaliados.

Variável	Mínimo	Médio	Máximo	Desvio Padrão	CV (%)
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria					
Ds (Mg m^{-3})	1,30	1,55	1,73	0,12	7,71
Iv	0,39	0,56	0,88	0,12	22,30
Uv ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,14	0,22	0,35	0,06	26,34
Latosolo Vermelho Distrofítico típico - Passo Fundo					
Ds (Mg m^{-3})	1,18	1,50	1,77	0,11	7,57
Iv	0,37	0,64	1,10	0,13	19,97
Uv ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,11	0,24	0,35	0,05	21,52
Latosolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff					
Ds (Mg m^{-3})	1,04	1,34	1,54	0,12	8,61
Iv	0,68	0,95	1,52	0,18	18,84
Uv ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,20	0,36	0,54	0,07	18,82
Latosolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque					
Ds (Mg m^{-3})	1,14	1,40	1,56	0,09	6,49
Iv	0,57	0,78	1,21	0,13	16,32
Uv ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,22	0,32	0,42	0,05	15,21

Entre as propriedades utilizadas para indicar a condição estrutural dos solos, o Iv apresentou maiores valores de CV, sendo que os valores variaram de 16,32%

(LVdf-NMT) a 22,30% (PVAd), enquanto que para a variável Ds os valores de CV foram menores, oscilando de 6,49% a 8,61% (Tabela 6). Foram observados valores mínimos de Ds de 1,04 Mg m⁻³ para o LVdf-VG, 1,14 Mg m⁻³ para o LVdf-NMT, 1,18 Mg m⁻³ para o LVd e 1,30 para o PVAd, e valores máximos próximos (1,73 Mg m⁻³ para o PVAd, 1,54 Mg m⁻³ para o LVdf-VG e 1,56 Mg m⁻³ para o LVdf-NMT) ou acima (1,77 Mg m⁻³ para o LVd) do valor crítico ao crescimento de plantas, quando considerado o intervalo hídrico ótimo (REICHERT et al., 2009a).

As relações do Cd com as variáveis indicadoras de condição estrutural são apresentadas nas Figuras 8, 9, 10 e 11 e as suas informações estatísticas na Tabela 7. O Cd apresentou uma relação inversamente proporcional com a Ds e diretamente proporcional com o lv em todas as tensões para os solos PVAd, LVd e LVdf-VG, enquanto que para o solo LVdf-NMT relações significativas com a Ds e o lv foram observadas em tensões de 6 e 10 kPa.

O efeito significativo das variáveis estruturais (Ds e lv) no comportamento do Cd mostra o quanto a elasticidade é influenciada pela compactação do solo. Pesquisas mostram que o principal efeito da compactação nas propriedades estruturais do solo se concentra, principalmente, na redução dos macroporos e no aumento da Ds (MENTGES et al., 2010; EDEN et al., 2011). Essa condição ocasiona ao solo um contato mais próximo entre os agregados, que proporciona uma maior resistência deste à ocorrência de compressões e descompressões, promovendo uma menor elasticidade (MENTGES et al., 2013). Assim, além da maior resistência à deformação (VEIGA et al., 2007; SUZUKI et al., 2008), solos compactados também apresentam uma menor capacidade de retornar naturalmente à condição estrutural anterior após a aplicação de pressões, o que indica uma condição de inferior qualidade estrutural.

Os coeficiente de determinação observados nas relações do Cd com a Ds e o lv foram maiores no PVAd e reduziram gradativamente nos solos LVd, LVdf-VG e LVdf-NMT (Tabela 7). Esse comportamento indica o maior efeito das variáveis indicadoras da condição estrutural na elasticidade de solos arenosos. Além disso, nas equações lineares ajustadas entre essas variáveis, os maiores valores de coeficiente angular ocorreram nos solos com maior quantidade de areia (PVAd e LVd), mostrando que a alteração na sua estrutura afeta mais intensamente a elasticidade. No entanto, à medida que a quantidade de argila aumenta no solo, os coeficientes angulares diminuem, indicando que outras variáveis também afetam a

elasticidade, tais como os teores de MOS e de argila e o conteúdo de água no solo (PERDOK et al., 2002; BRAIDA et al., 2008). Esse efeito foi observado no solo LVdf-NMT que, dentre os avaliados, é o que apresenta as amostras mais argilosas (Tabela 2). Para este solo, a regressão não foi significativa entre a Ds e o Iv com o Cd, quando avaliado com amostras equilibradas nas tensões de 33 e 100 kPa (Figuras 9 e 11 e Tabela 7). Isso indica que, em solos argilosos e com a umidade na capacidade de campo ou abaixo desta, a condição estrutural não é determinante no comportamento da elasticidade, estando esse efeito associado mais à própria composição (teores de argila e MOS) e à umidade desses solos.

Dessa forma, considerando o aspecto da elasticidade do solo, maiores cuidados quanto à compactação são necessários em solos arenosos. Apesar de estes serem menos suscetíveis à compactação, têm a elasticidade reduzida quando a capacidade de suporte de carga é superada. Além disso, apesar da elasticidade estar fortemente associada à condição estrutural, o incremento no teor de COT ou da MOS de solos arenosos pode afetar significativa e positivamente a sua elasticidade, como demonstrado no trabalho de Braida et al. (2008). Esses pesquisadores observaram que o aumento no COT, proporcionado pela aplicação de diferentes doses de dejetos líquidos de suíno em um Argissolo Vermelho-Amarelo de textura franco arenosa, elevou os valores de Cd, ocasionando maior elasticidade.

O Ir apresentou relação significativa com a Ds e o Iv nas amostras equilibradas nas tensões de 6, 33 e 100 kPa no LVd, na tensão de 100 kPa no LVdf-VG e nas tensões de 6, 10 e 33 kPa no LVdf-NMT (Figuras 12, 13, 14 e 15), sendo que para essas relações os valores dos coeficientes de determinação foram baixos (Tabela 8). Além disso, a relação do Ir com a Ds e o Iv foi contraditória quando comparado ao observado para o Cd, uma vez que um aumento na compactação ocasionou maiores valores de Ir. No entanto, esse comportamento pode estar associado à forma que a Ir é determinada, uma vez que é expressa a relação entre a variação do Iv durante o descarregamento e o carregamento. Portanto, mesmo ocorrendo pouca deformação durante o carregamento, uma pequena expansão do solo no descarregamento proporciona elevados percentuais de recuperação, constatação também observada nos trabalhos de Braida et al. (2008) e Mentges et al. (2013). Isso indica que cuidados são necessários quando o Ir é utilizado como indicador da elasticidade do solo.

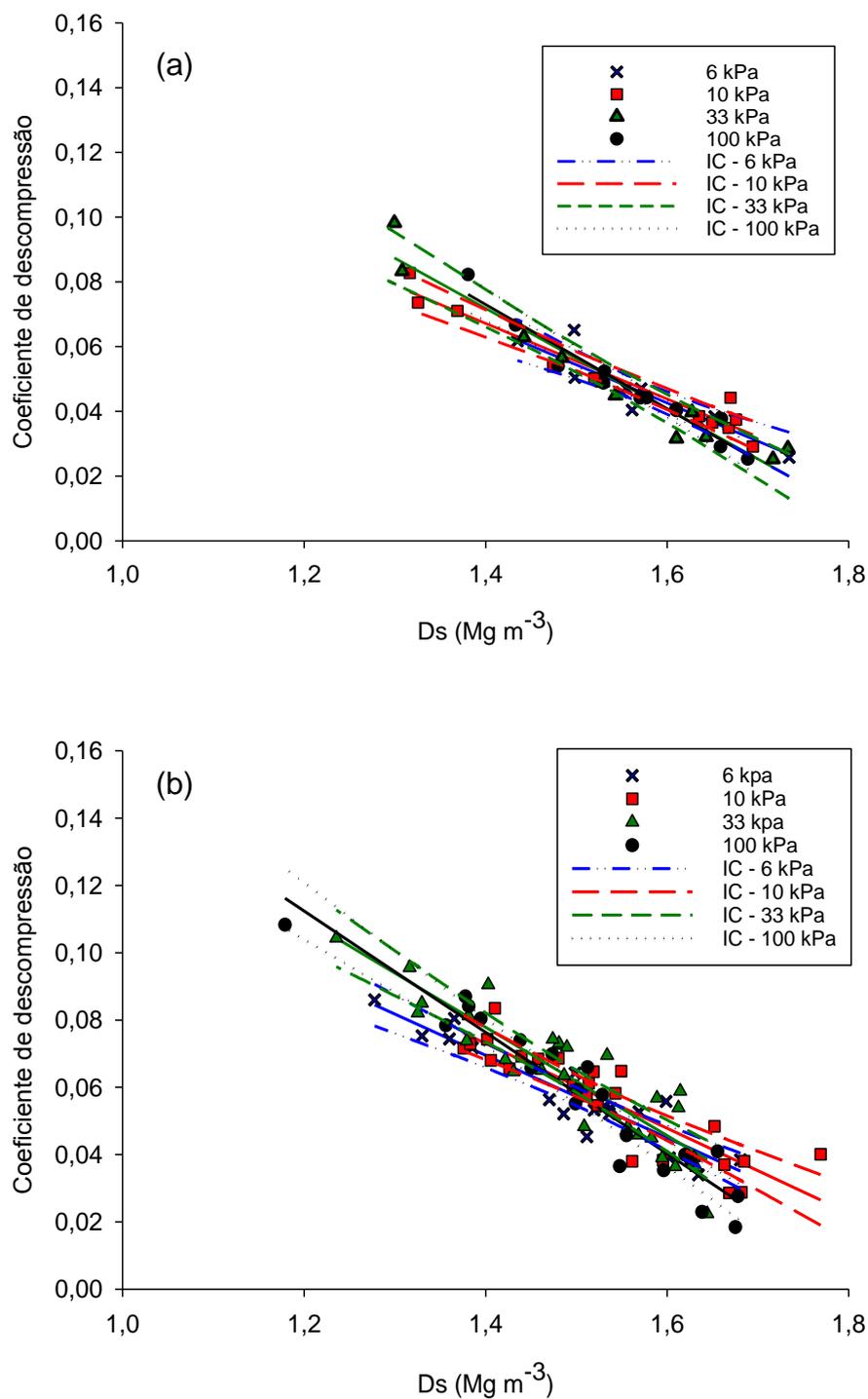


Figura 8 – Relação do coeficiente de descompressão com a densidade do solo (D_s) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.

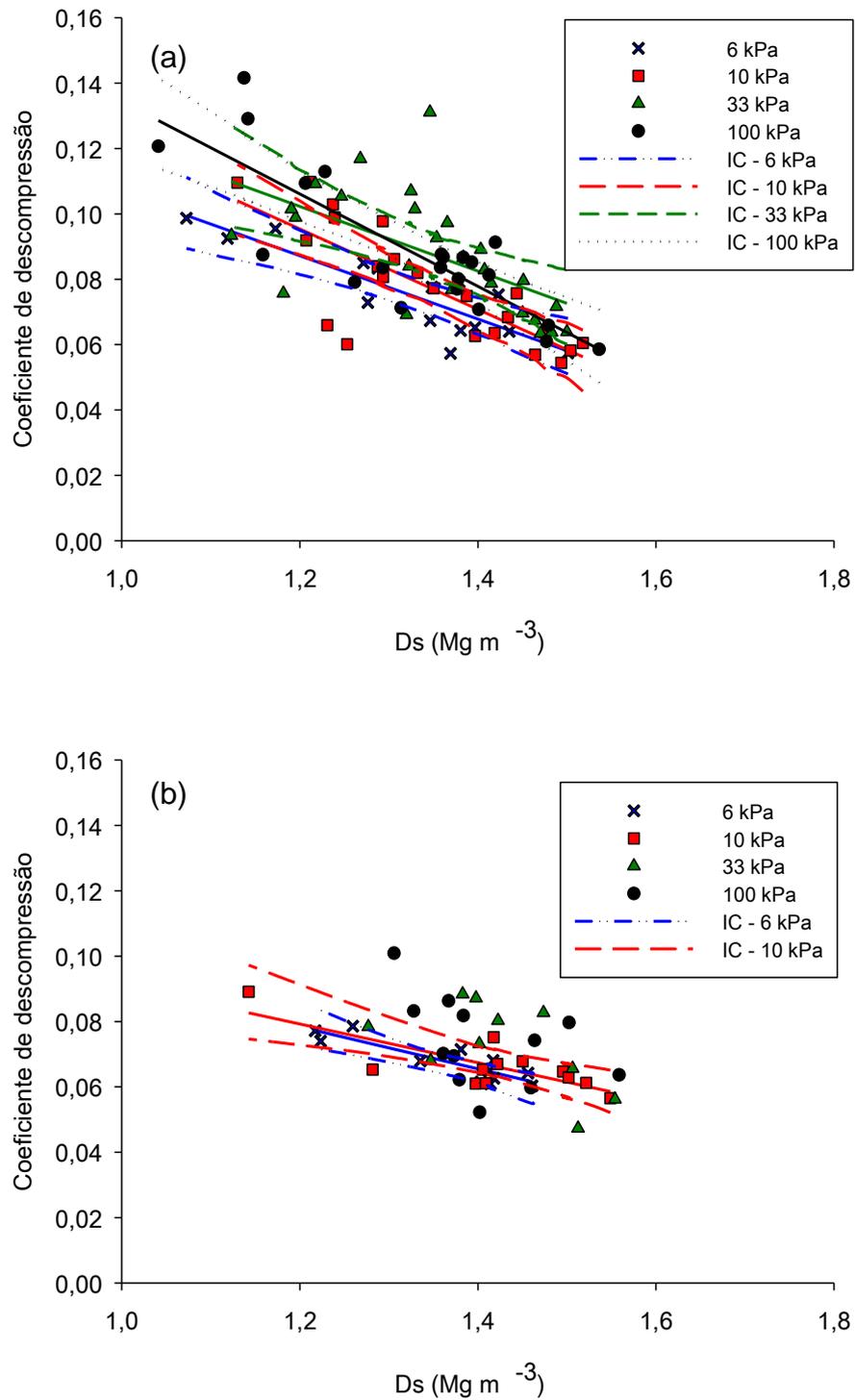


Figura 9 – Relação do coeficiente de descompressão com a densidade do solo (D_s) em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.

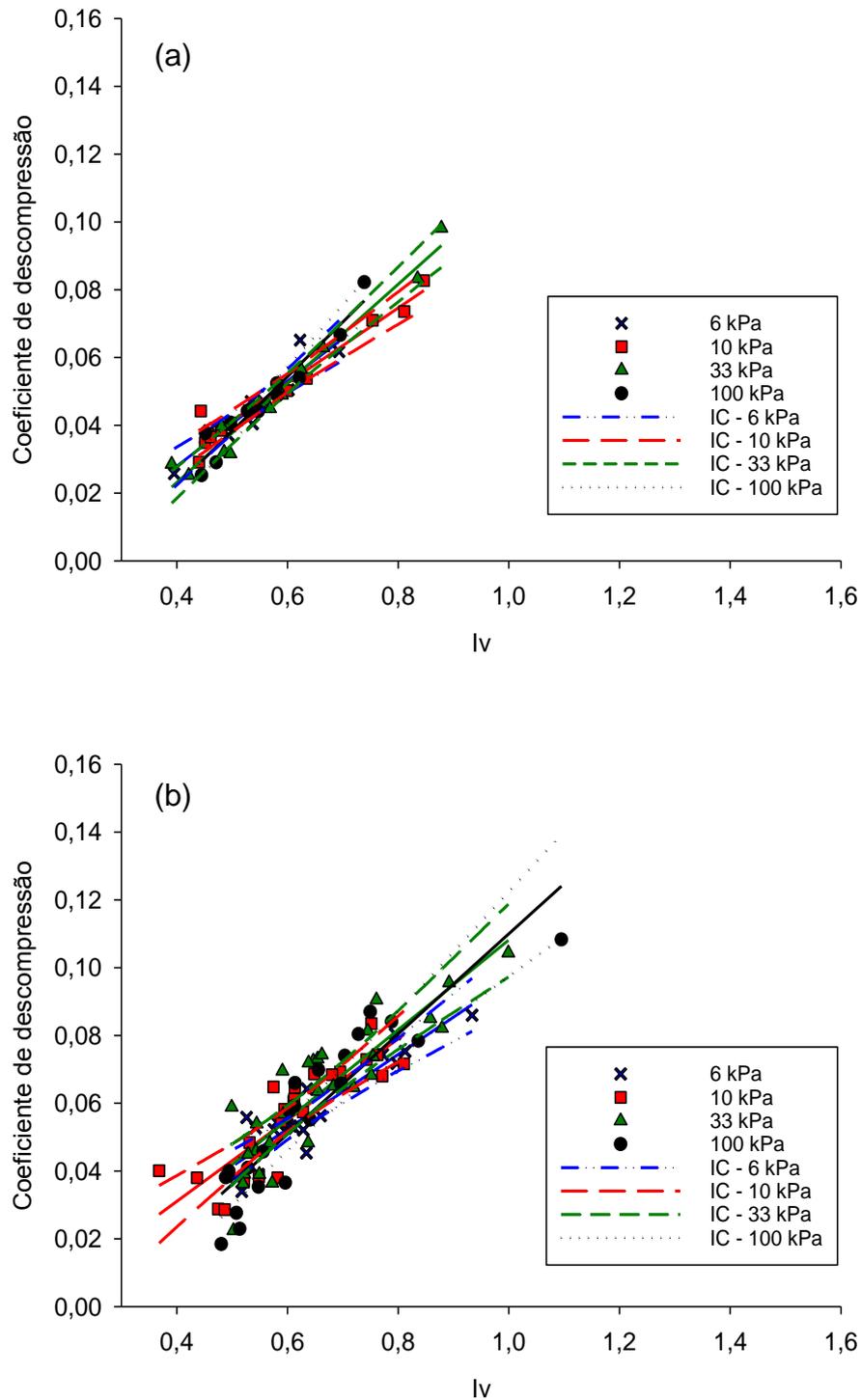


Figura 10 – Relação do coeficiente de descompressão com o índice de vazios (I_v) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.

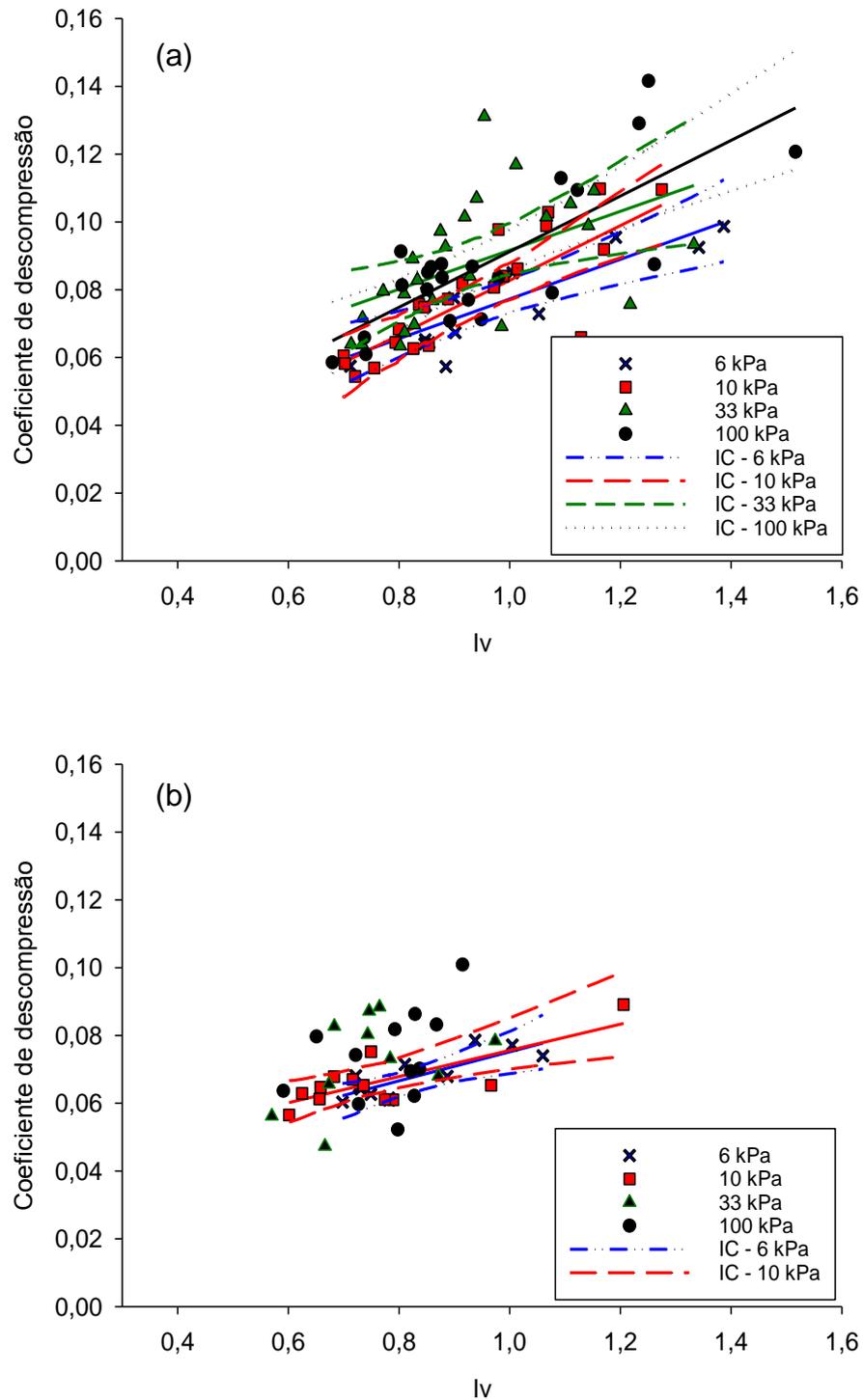


Figura 11 – Relação do coeficiente de descompressão com o índice de vazios (I_v) em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.

Tabela 7 - Significância ($Pr > F$), coeficiente angular (a), intercepto (b), coeficiente de determinação (R^2) e número de amostras (N) da regressão linear para a variável dependente (VD) coeficiente de descompressão (Cd) e as variáveis independentes (VI) densidade do solo (Ds) e índice de vazios (lv) dos solos avaliados.

Tensão	VD	VI	Pr > F	a	b	R^2	N
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria							
6	Cd	Ds	<0,0001	-0,1180	0,2314	0,826	11
10	Cd	Ds	<0,0001	-0,1168	0,2306	0,943	11
33	Cd	Ds	<0,0001	-0,1551	0,2889	0,937	11
100	Cd	Ds	<0,0001	-0,1611	0,2985	0,942	12
6	Cd	lv	<0,0001	0,1255	-0,0222	0,864	11
10	Cd	lv	<0,0001	0,1111	-0,0142	0,951	11
33	Cd	lv	<0,0001	0,1464	-0,0355	0,967	11
100	Cd	lv	<0,0001	0,1614	-0,0424	0,929	12
Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo							
6	Cd	Ds	<0,0001	-0,1226	0,2411	0,854	19
10	Cd	Ds	<0,0001	-0,1261	0,2496	0,783	24
33	Cd	Ds	<0,0001	-0,1612	0,3035	0,814	28
100	Cd	Ds	<0,0001	-0,1804	0,3288	0,917	21
6	Cd	lv	<0,0001	0,1102	-0,0138	0,822	19
10	Cd	lv	<0,0001	0,1199	-0,0169	0,727	24
33	Cd	lv	<0,0001	0,1326	-0,0244	0,757	28
100	Cd	lv	<0,0001	0,1479	-0,0379	0,823	21
Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff							
6	Cd	Ds	0,0002	-0,0949	0,2019	0,650	15
10	Cd	Ds	<0,0001	-0,1267	0,2476	0,600	23
33	Cd	Ds	0,0018	-0,1052	0,2293	0,324	25
100	Cd	Ds	<0,0001	-0,1365	0,2698	0,655	22
6	Cd	lv	0,0005	0,0569	0,0213	0,594	15
10	Cd	lv	<0,0001	0,0836	-0,0010	0,568	23
33	Cd	lv	0,0074	0,0614	0,0306	0,242	25
100	Cd	lv	<0,0001	0,0799	0,0116	0,589	22
Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque							
6	Cd	Ds	0,0010	-0,0737	0,1673	0,645	12
10	Cd	Ds	0,0028	-0,0669	0,1622	0,567	12
33	Cd	Ds	0,0789	-	-	-	10
100	Cd	Ds	0,1236	-	-	-	12
6	Cd	lv	0,0052	0,0486	0,0267	0,514	12
10	Cd	lv	0,0049	0,0424	0,0351	0,521	12
33	Cd	lv	0,2482	-	-	-	10
100	Cd	lv	0,1779	-	-	-	12

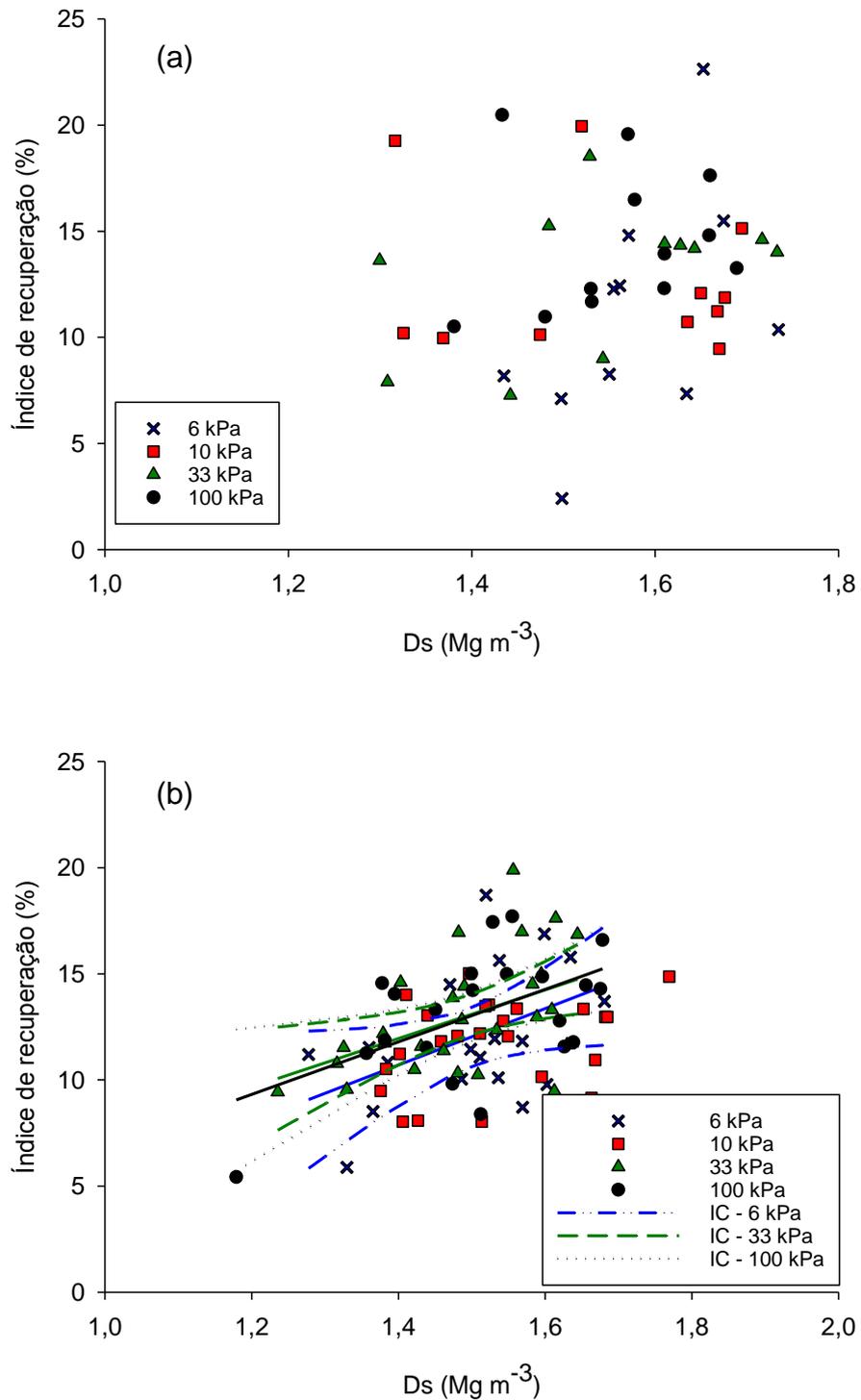


Figura 12 – Relação do índice de recuperação com a densidade do solo (D_s) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.

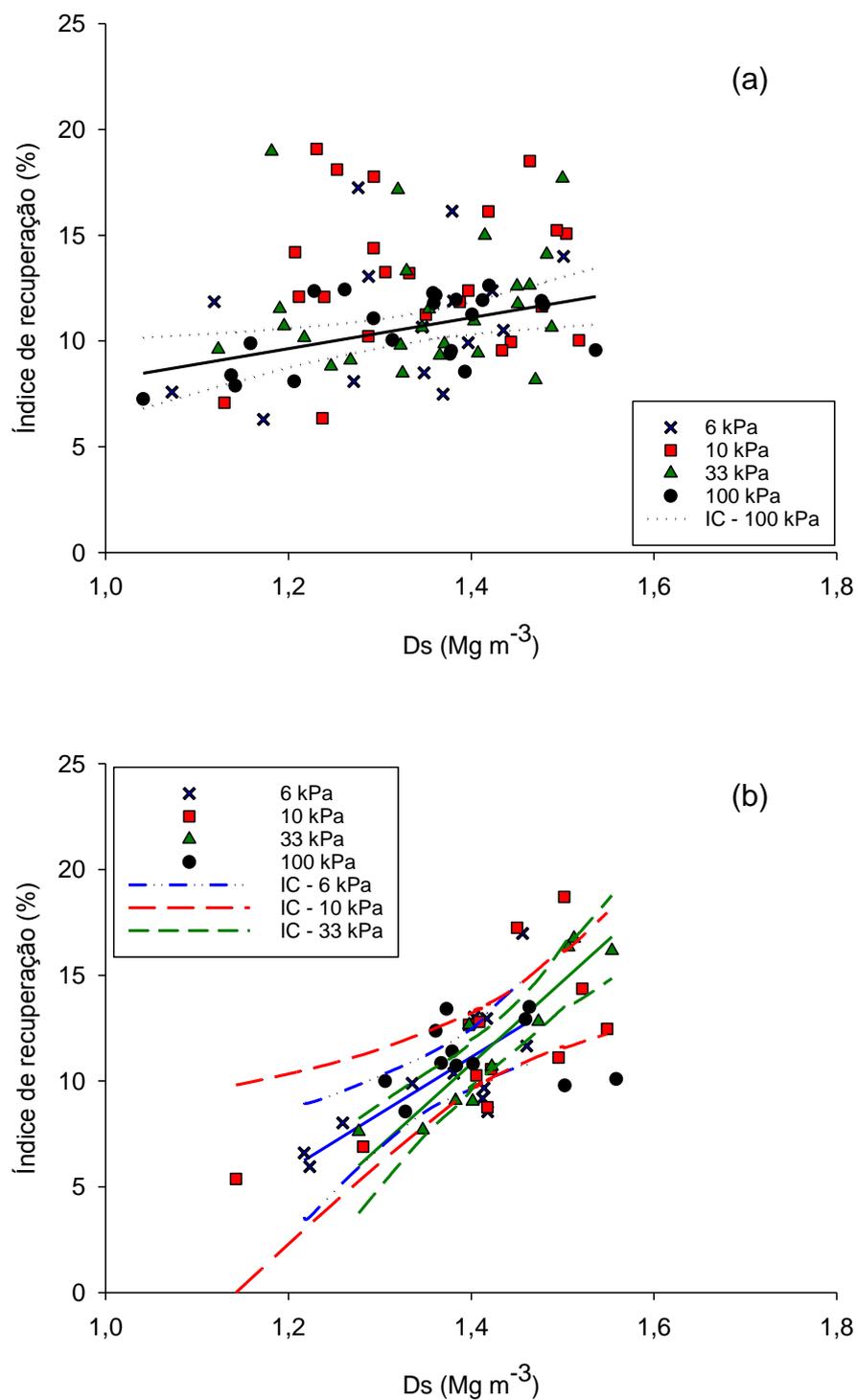


Figura 13 – Relação do índice de recuperação com a densidade do solo (D_s) em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.

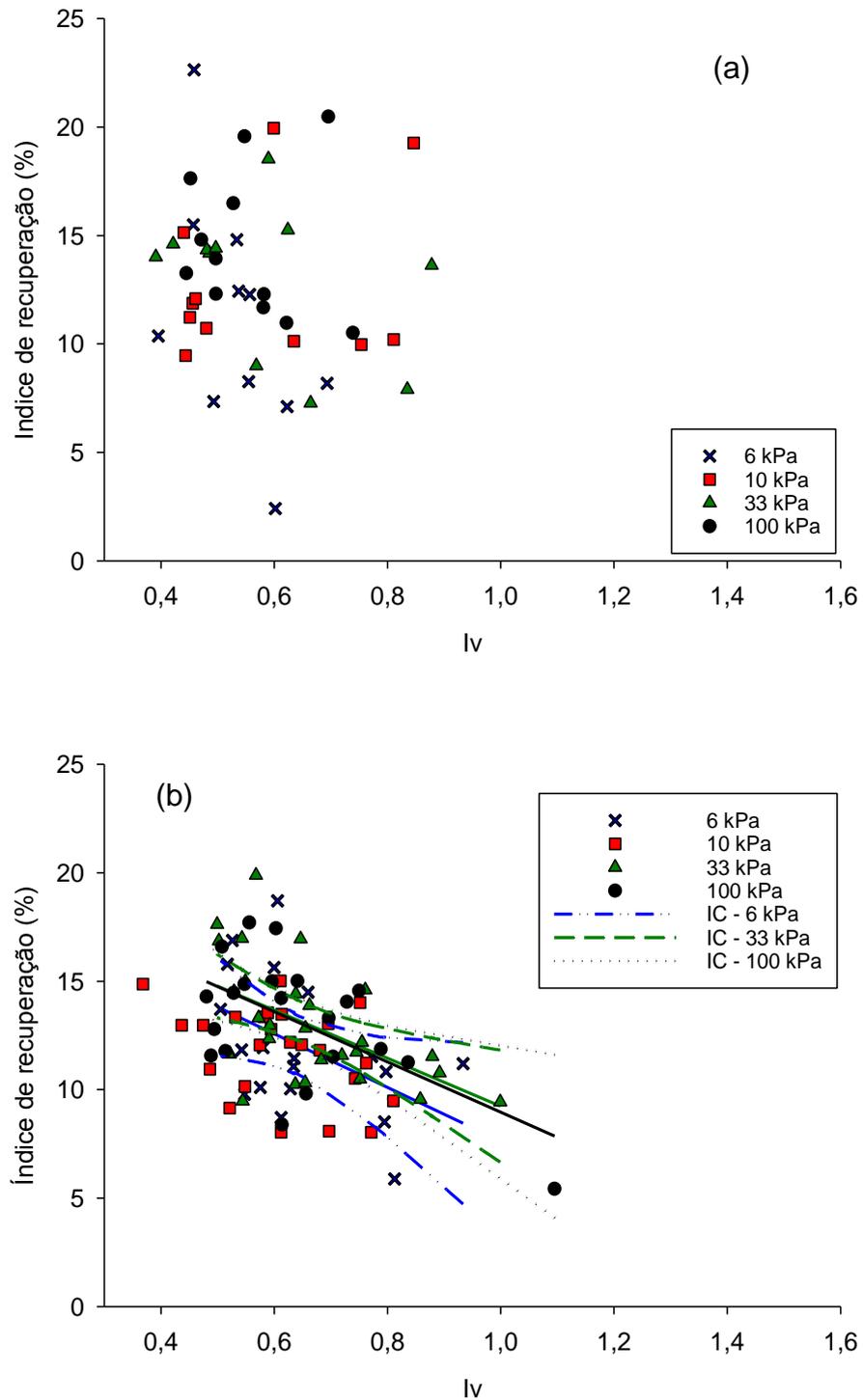


Figura 14 – Relação do índice de recuperação com o índice de vazios (lv) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.

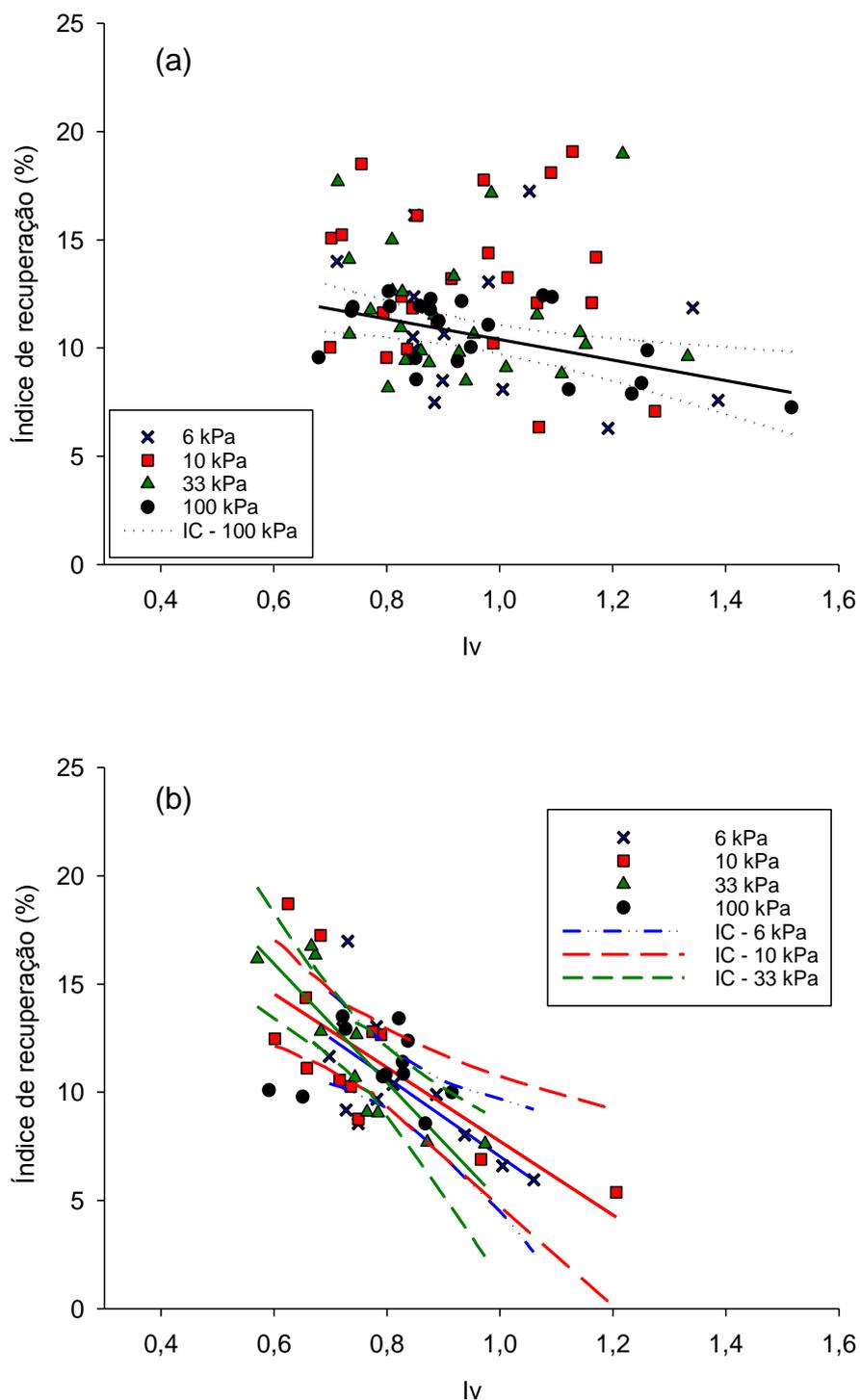


Figura 15 – Relação do índice de recuperação com o índice de vazios (I_v) em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.

Tabela 8 - Significância ($Pr > F$), coeficiente angular (a), intercepto (b), coeficiente de determinação (R^2) e número de amostras (N) da regressão linear para a variável dependente (VD) índice de recuperação (lr) e as variáveis independentes (VI) densidade do solo (Ds) e índice de vazios (lv) dos solos avaliados.

Tensão	VD	VI	Pr > F	a	b	R^2	N
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria							
6	lr	Ds	0,1317	-	-	-	11
10	lr	Ds	0,5850	-	-	-	11
33	lr	Ds	0,1819	-	-	-	11
100	lr	Ds	0,6398	-	-	-	12
6	lr	lv	0,0986	-	-	-	11
10	lr	lv	0,4985	-	-	-	11
33	lr	lv	0,2180	-	-	-	11
100	lr	lv	0,7154	-	-	-	12
Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo							
6	lr	Ds	0,0486	13,3163	-7,9440	0,163	19
10	lr	Ds	0,1150	-	-	-	24
33	lr	Ds	0,0119	11,4682	-4,1025	0,190	28
100	lr	Ds	0,0130	12,3829	-5,5451	0,245	21
6	lr	lv	0,0445	-12,3799	20,0058	0,171	19
10	lr	lv	0,0615	-	-	-	24
33	lr	lv	0,0036	-11,0779	20,3123	0,255	28
100	lr	lv	0,0062	-11,5897	20,5516	0,297	21
Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff							
6	lr	Ds	0,2140	-	-	-	15
10	lr	Ds	0,6761	-	-	-	23
33	lr	Ds	0,5958	-	-	-	25
100	lr	Ds	0,0108	7,2685	0,9219	0,247	22
6	lr	lv	0,2597	-	-	-	15
10	lr	lv	0,6718	-	-	-	23
33	lr	lv	0,7063	-	-	-	25
100	lr	lv	0,0062	-4,7445	15,1406	0,285	22
Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque							
6	lr	Ds	0,0037	27,0180	26,6871	0,545	12
10	lr	Ds	0,0075	25,0134	23,6673	0,479	12
33	lr	Ds	0,0001	40,1282	45,3779	0,838	10
100	lr	Ds	0,7699	-	-	-	12
6	lr	lv	0,0087	-18,3726	25,3796	0,466	12
10	lr	lv	0,0048	-17,0447	24,7933	0,521	12
33	lr	lv	0,0015	-27,4745	32,3810	0,704	10
100	lr	lv	0,8673	-	-	-	12

Conforme mostra o trabalho de Perdok et al. (2002), o efeito da umidade na elasticidade está associado à presença de bolhas de ar no solo, que se expandem à medida que este seca, deslocando as partículas do solo e, por consequência, aumentando a elasticidade. Em seu trabalho, Gregory et al. (2009) também observaram que a redistribuição da água no solo após a remoção das pressões é um importante processo na recuperação dos solos. O efeito da umidade na elasticidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico de textura franco arenosa e de um Nitossolo Vermelho distrófico latossólico de textura argilosa foi avaliado por Braida et al. (2008), que constataram que, à medida que o solo seca, mais facilmente o ar é expulso dos poros durante a compressão, enquanto que em maiores condições de umidade, a maior quantidade de água dificulta a expulsão do ar dos poros, aumentando o confinamento de bolhas de ar, resultando no aumento da elasticidade do solo. Esses autores salientaram ainda que esse comportamento é mais intenso quando o tempo de compressão e descompressão é curto, tal como o tráfego de uma máquina ou o pisoteio animal.

Considerando o intervalo de confiança (IC) das relações obtidas nas diferentes condições de umidade (Figuras 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15), observa-se que essa variável independente foi pouco determinante no comportamento da elasticidade do solo. Para os solos PVAd, LVd e LVdf-NMT, em nenhuma das relações avaliadas (C_d e I_r versus D_s e I_v) a umidade apresentou efeito significativo, tendo inclusive as retas das relações apresentado um comportamento semelhante. Contudo, para o LVdf-VG, a umidade teve um efeito na relação C_d versus D_s nas amostras com D_s menor de $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$, enquanto que acima desse valor diferenças em função da umidade não ocorreram mais. As alterações no comportamento do C_d ocorreram entre as amostras equilibradas nas tensões de 6 e 100 kPa, sendo os maiores valores de C_d nas amostras mais secas.

Tal comportamento decorre do fato que o LVdf-VG, além de apresentar maior quantidade de argila, é naturalmente menos denso e, quando se encontra com o conteúdo de água do solo acima da capacidade de campo (amostras equilibradas na tensão de 6 kPa), tende a apresentar uma maior deformação durante o processo de compressão, facilmente superando a capacidade de suporte de carga e assim alterando significativamente a estrutura, ocasionando uma menor recuperação durante a descompressão. Em solo úmido, a água atua como um lubrificante entre as partículas e os agregados, deixando-o mais macio, alterando seu estado de

consistência e conseqüente redução da capacidade de suporte de carga. Além disso, um solo mais argiloso, dada sua tendência de possuir uma maior capacidade de retenção de água, apresenta maior suscetibilidade à compactação, pois a água forma uma película sobre as partículas sólidas, atuando como um lubrificante, facilitando o deslocamento e o rearranjo das partículas nos vazios do solo (REICHERT et al., 2010).

É provável que as condições de umidade avaliadas neste trabalho contribuíram para a ausência de um efeito significativo no comportamento da elasticidade. Considerando o trabalho de Braida et al. (2008), no qual as amostras de solo foram equilibradas nas tensões de 6, 100, 500 e maior que 500 kPa, em que amostras com menor umidade foram submetidas ao ensaio de compressão se comparadas ao presente trabalho, no qual as amostras foram equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. No entanto, no presente trabalho procurou-se realizar os ensaios de compressão em condições de umidade em que o solo é frequentemente trafegado e maiores alterações na estrutura tendem a ocorrer, ou seja, com umidades na capacidade de campo CC (10 kPa) e mais (6 kPa) e menos (33 e 100 kPa) úmido do que na CC.

A relação da argila e da MOS com o Cd e o Ir são apresentadas nas Figuras 16 e 17 e dispostas na Tabela 9. O Cd apresentou relação direta com a quantidade de argila e o teor de MOS nos quatro solos e nas quatro tensões avaliadas, enquanto que a variável Ir apresentou relação significativa e negativa com o incremento de argila nas tensões de 33 e 100 kPa, significativa e positiva com o teor de MOS na tensão 10 kPa e negativa na tensão de 100 kPa.

Como a mineralogia da fração argila dos Latossolos e Argissolos do Rio Grande do Sul é composta principalmente por caulinita (argilomineral do tipo 1:1) e óxidos de ferro (hematita e goethita), ambos argilominerais indicadores de ambientes com intenso intemperismo e, portanto, com as características naturais de expansão e contração reduzidas, possivelmente o incremento na elasticidade (expressa pelo Cd) à medida que aumenta a quantidade de argila no solo (Figura 16a) é em função da capacidade de maior retenção de água. Naturalmente, a capacidade de retenção de água de solos argilosos é maior, principalmente em função de sua condição estrutural (maior quantidade de microporos), proporcionando assim um maior confinamento de bolhas de ar do que em solos

arenosos, proporcionando maior elasticidade (PERDOK et al., 2002; BRAIDA et al.; 2008).

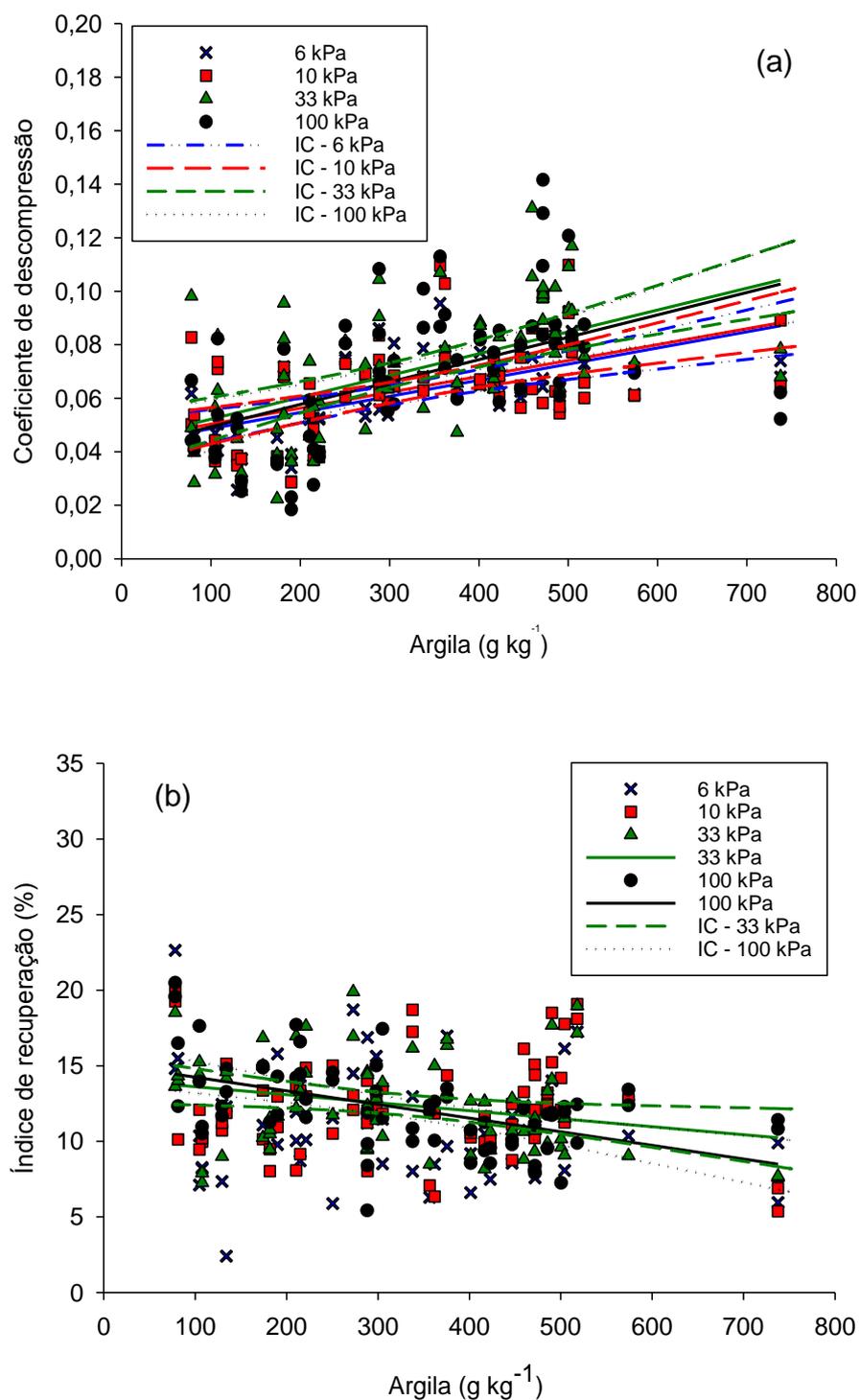


Figura 16 – Relação do coeficiente de descompressão (a) e do índice de recuperação (b) com a quantidade de argila em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.

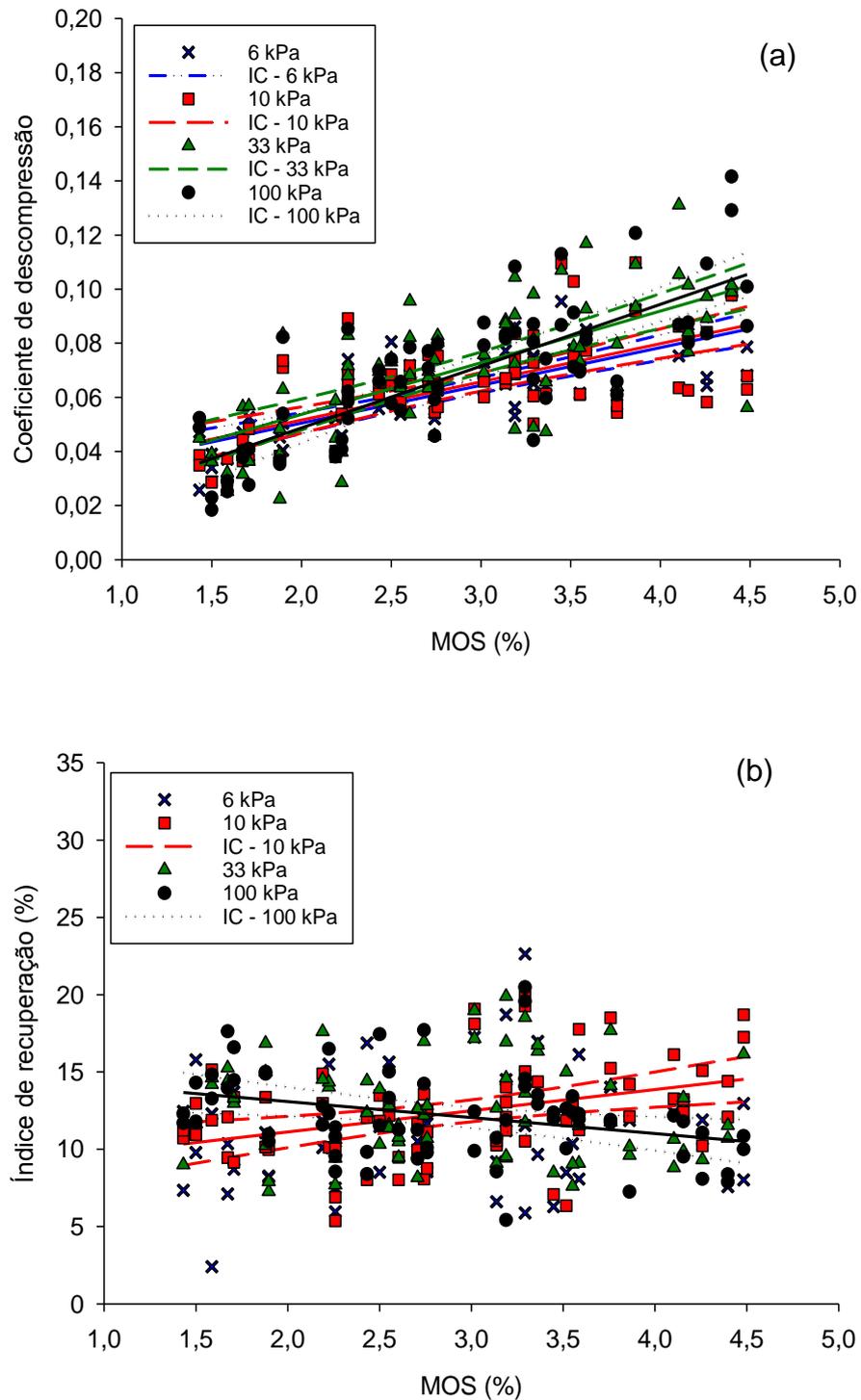


Figura 17 – Relação do coeficiente de descompressão (a) e do índice de recuperação (b) com a quantidade de matéria orgânica do solo (MOS) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.

Tabela 9 - Significância ($Pr > F$), coeficiente angular (a), intercepto (b), coeficiente de determinação (R^2) e número de amostras (N) da regressão linear para as variáveis dependentes (VD) coeficiente de descompressão (Cd) e índice de recuperação (Ir) e as variáveis independentes (VI) argila e matéria orgânica do solo (MOS) dos solos avaliados.

Tensão	VD	VI	Pr > F	a	b	R^2	N
6	Cd	Argila	<0,0001	0,00006	0,04396	0,308	57
10	Cd	Argila	<0,0001	0,00006	0,04345	0,267	70
33	Cd	Argila	<0,0001	0,00008	0,04403	0,293	74
100	Cd	Argila	<0,0001	0,00008	0,04181	0,258	67
6	Cd	MOS	<0,0001	0,01377	0,02335	0,537	57
10	Cd	MOS	<0,0001	0,01370	0,02447	0,406	70
33	Cd	MOS	<0,0001	0,01934	0,01487	0,478	74
100	Cd	MOS	<0,0001	0,02259	0,00404	0,604	67
6	Ir	Argila	0,5126	-	-	-	57
10	Ir	Argila	0,9403	-	-	-	70
33	Ir	Argila	0,0187	-0,00528	14,13727	0,061	74
100	Ir	Argila	<0,0001	-0,00903	15,15081	0,246	67
6	Ir	MOS	0,2374	-	-	-	57
10	Ir	MOS	0,0013	1,36936	8,37586	0,130	70
33	Ir	MOS	0,4967	-	-	-	74
100	Ir	MOS	0,0087	-1,03612	15,15130	0,087	67

No entanto, os coeficientes de determinação da relação linear entre o Cd e a quantidade de argila foram baixos, inclusive se comparados aos coeficientes obtidos na relação com os parâmetros estruturais (Ds e Iv). Novamente o Ir teve reduzida relação com a quantidade de argila presente no solo e, quando foi significativa, apresentou-se contraditória. Além disso, as semelhanças das retas e dos IC para as quatro tensões avaliadas indicam que, independente da quantidade de argila presente, uma maior quantidade de água não vai afetar significativamente a elasticidade.

A MOS pode atuar como uma espécie de mola mecânica no solo, permitindo a sua recuperação após a ocorrência de pressões externas (ZHANG et al., 2005). Estes autores apontam que tal efeito se deve à capacidade da MOS em preencher os poros do solo, elevando assim a quantidade de poros de menor diâmetro, contribuindo para uma maior porosidade total, que repercute em um inchamento do solo em condições de maior umidade. Além disso, a capacidade de expansão das partículas orgânicas também tem um efeito relevante (SOANE, 1990). No entanto,

Mentges et al. (2013) observaram que maiores valores de COT no solo repercutem em uma maior elasticidade somente em horizontes com estrutura prismática, enquanto que em estruturas menos desenvolvidas ou com elevado estado de compactação (estrutura maciça), o incremento de COT pode não proporcionar maior elasticidade. Porém, no presente trabalho, esse efeito foi significativo, com maiores valores de C_d à medida que se elevava a MOS (Figura 17a), sem efeitos significativos, no entanto, das diferenças na quantidade de água no solo.

5.2 Capacidade de suporte de carga e suscetibilidade à compactação

A estratégia adotada para a obtenção de variabilidade nas propriedades físicas e hídricas do solo e, por consequência, na capacidade de suporte de carga e na suscetibilidade à compactação foi adequada (Tabela 10). A variável U_v apresentou maior variação se comparada a variável D_s , com valores de CV de 26,48% para o PVAd, 21,40% para o LVd, 18,62% para o LVdf-VG e 15,11% para o LVdf-NMT. Os valores de U_v observados (mínimo, médio e máximo) foram menores nos solos arenosos (PVAd e LVd) se comparados aos argilosos (LVdf-NMT e LVdf-VG), mas com maiores valores de CV. Caracteristicamente, solos argilosos apresentam uma conformação estrutural diferente dos arenosos, com uma porosidade total maior e com predomínio de microporos, particularidade que proporciona aos solos argilosos uma maior retenção de água e condição que explica as diferenças observadas nos valores de U_v .

Os parâmetros compressivos avaliados (σ_p e I_c) apresentaram maiores valores de CV se comparadas às variáveis D_s e U_v (Tabela 10). Para a variável σ_p , os maiores valores de CV foram observados nos solos com maior quantidade de argila na sua composição (55,71% e 44,46% no LVdf-NMT e LVdf-VG, respectivamente), enquanto que para a variável I_c os maiores valores de CV observados foram no PVAd e LVd (38,72% e 35,44%, respectivamente). Os maiores valores de σ_p e I_c foram observados, respectivamente, no LVdf-NMT (605,32 kPa) e no LVdf-VG (0,64), enquanto que os menores valores ocorreram no LVdf-VG (52,87 kPa) e LVd (0,06).

Tabela 10 - Valor mínimo, médio e máximo, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) da densidade do solo (D_s), umidade volumétrica (U_v), pressão de preconsolidação (σ_p) e índice de compressão (I_c) dos solos avaliados.

Variável	Mínimo	Médio	Máximo	Desvio Padrão	CV (%)
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria					
D_s ($Mg\ m^{-3}$)	1,30	1,56	1,73	0,12	7,66
U_v ($m^3\ m^{-3}$)	0,14	0,22	0,35	0,06	26,48
σ_p (kPa)	84,12	181,15	335,57	63,99	35,33
I_c	0,08	0,17	0,36	0,07	38,72
Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo					
D_s ($Mg\ m^{-3}$)	1,18	1,50	1,68	0,11	7,34
U_v ($m^3\ m^{-3}$)	0,11	0,24	0,35	0,05	21,40
σ_p (kPa)	87,21	195,93	428,68	65,37	33,36
I_c	0,06	0,22	0,45	0,08	35,44
Latossolo Vermelho Distroférrico típico – Victor Graeff					
D_s ($Mg\ m^{-3}$)	1,04	1,34	1,54	0,11	8,61
U_v ($m^3\ m^{-3}$)	0,20	0,36	0,54	0,07	18,62
σ_p (kPa)	52,87	140,33	354,55	62,38	44,46
I_c	0,18	0,32	0,64	0,09	28,77
Latossolo Vermelho Distroférrico típico - Não-Me-Toque					
D_s ($Mg\ m^{-3}$)	1,14	1,40	1,56	0,09	6,46
U_v ($m^3\ m^{-3}$)	0,22	0,33	0,42	0,05	15,11
σ_p (kPa)	75,86	183,41	605,32	102,18	55,71
I_c	0,16	0,27	0,44	0,06	22,86

Para um mesmo solo, espera-se um efeito positivo da D_s na capacidade de suporte de carga (DEBIASI et al., 2008; SUZUKI et al., 2008), ou seja, maiores valores de σ_p estão associados a solos com maior estado de compactação (VOGELMANN et al., 2012). Além disso, o conteúdo de água constitui-se em outro fator determinante na capacidade do solo em resistir à compactação ou suportar cargas. Estudos observaram a redução da pressão de preconsolidação com o aumento da umidade do solo (SILVA e CABEDA, 2006).

No presente trabalho, a elevação na D_s ocasionou maiores valores de σ_p em todos os solos avaliados (Figura 18 e 19 e Tabela 11). Para o PVAd, a D_s é a variável independente responsável por 71,3% da variação da σ_p (nas amostras equilibradas na tensão de 10 kPa), enquanto que no LVd a importância da D_s na capacidade de suporte de carga é de 47,8% e 81,4% respectivamente, para amostras equilibradas nas tensões de 6 e 33 kPa. Contudo, quando considerado os solos LVdf-VG e LVdf-NMT (mais argilosos), o efeito da D_s é menos expressivo, com valores de R^2 oscilando de 0,224 a 0,596.

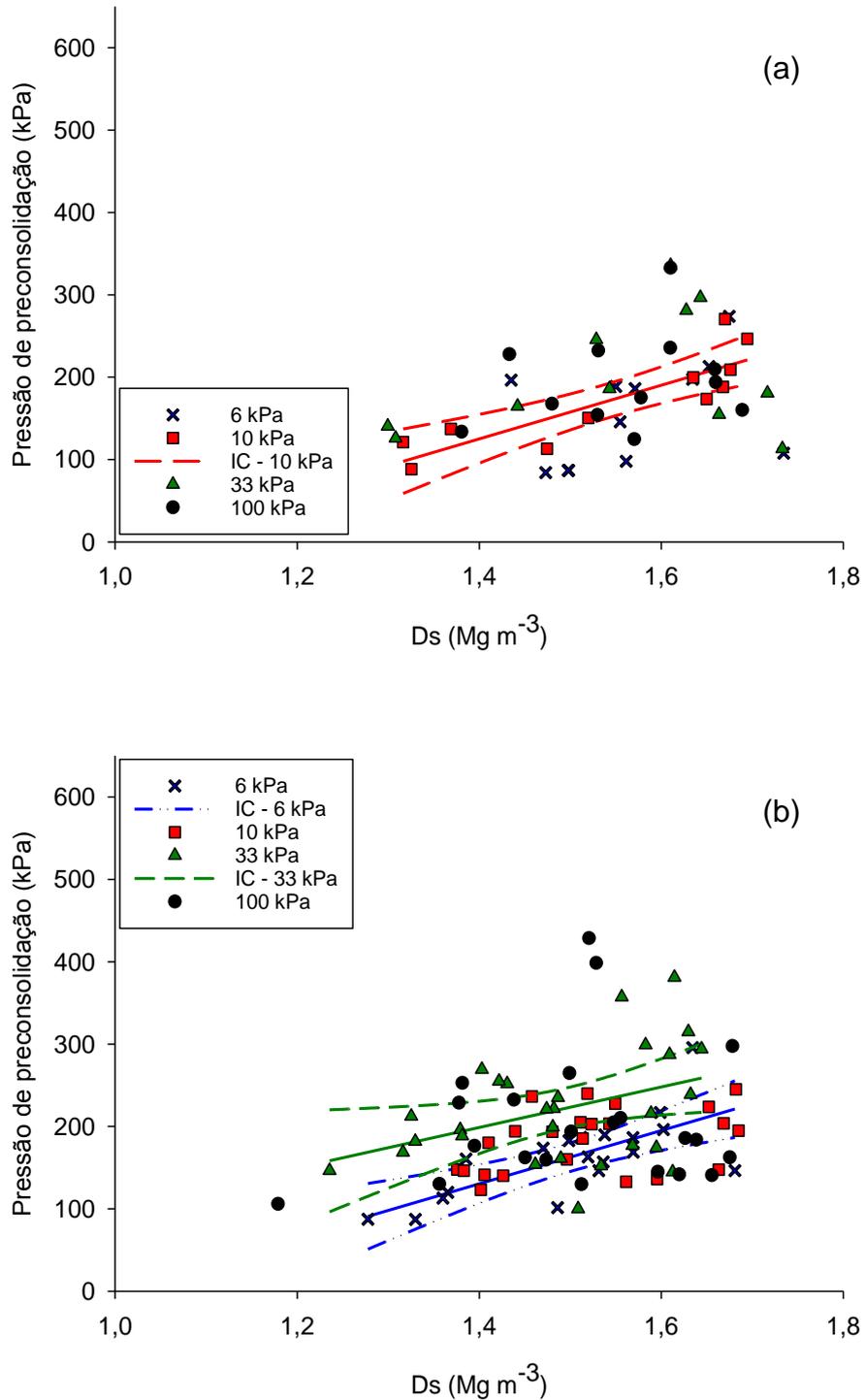


Figura 18 – Relação da pressão de preconsolidação com a densidade do solo (D_s) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.

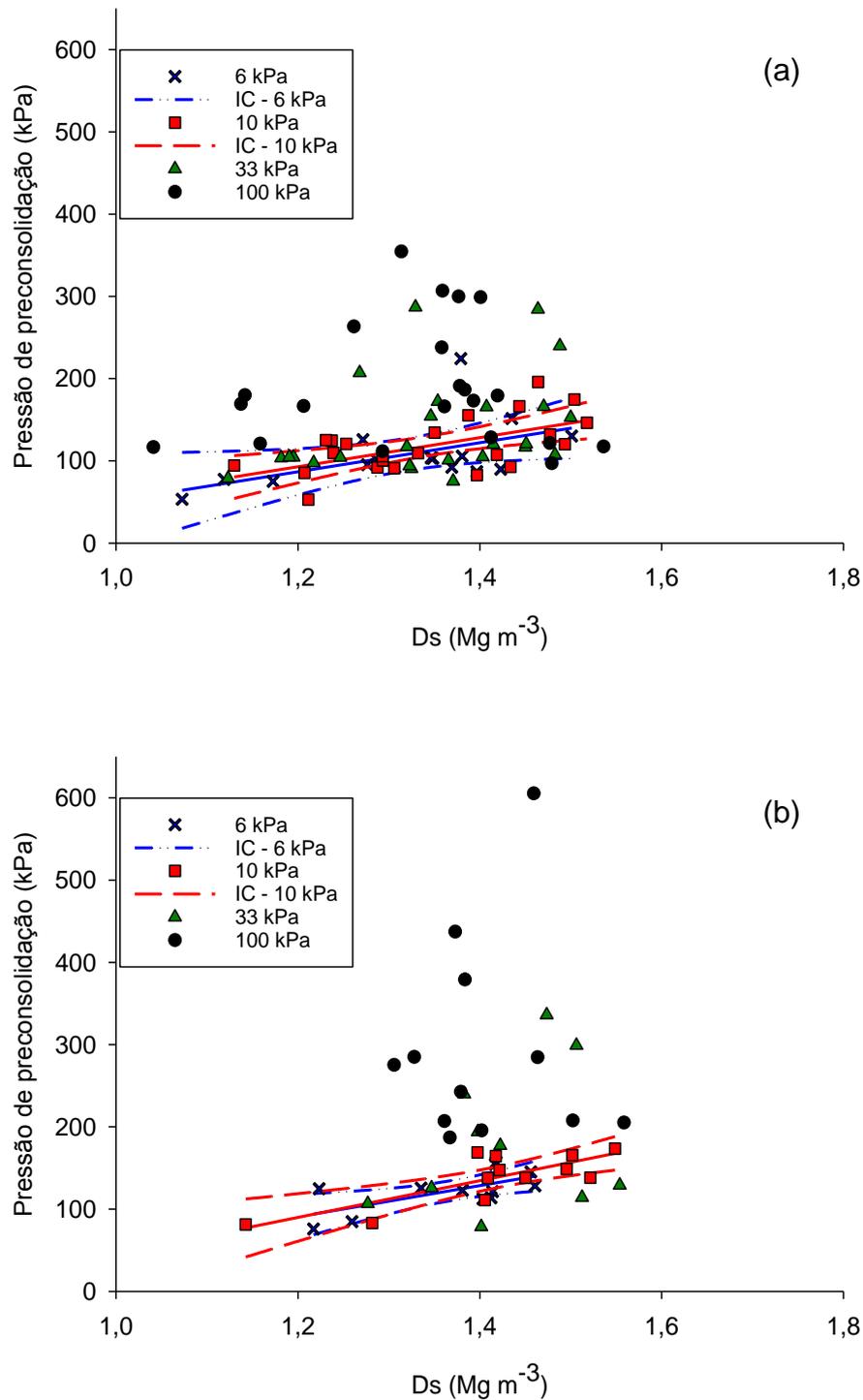


Figura 19 – Relação da pressão de preconsolidação com a densidade do solo (D_s) em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.

Tabela 11 – Significância ($Pr > F$), coeficiente angular (a), intercepto (b), coeficiente de determinação (R^2) e número de amostras (N) da regressão linear para a variável dependente (VD) “pressão de preconsolidação (σ_p)” e a variável independente (VI) “densidade do solo (Ds)” dos solos avaliados.

Tensão	VD	VI	Pr > F	a	b	R^2	N
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria							
6	σ_p	Ds	0,2244	-	-	-	12
10	σ_p	Ds	0,0007	325,53198	-330,5116	0,713	11
33	σ_p	Ds	0,3578	-	-	-	11
100	σ_p	Ds	0,4669	-	-	-	12
Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo							
6	σ_p	Ds	0,0006	322,7668	-321,4208	0,478	19
10	σ_p	Ds	0,0598	-	-	-	23
33	σ_p	Ds	0,0312	245,8008	-145,3230	0,814	28
100	σ_p	Ds	0,5604	-	-	-	22
Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff							
6	σ_p	Ds	0,0426	176,4275	-125,0279	0,224	15
10	σ_p	Ds	0,0027	176,8615	-119,4185	0,324	23
33	σ_p	Ds	0,0654	-	-	-	25
100	σ_p	Ds	0,8641	-	-	-	21
Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque							
6	σ_p	Ds	0,0163	189,1999	-136,3175	0,399	12
10	σ_p	Ds	0,0020	223,3561	-178,1007	0,596	12
33	σ_p	Ds	0,4078	-	-	-	10
100	σ_p	Ds	0,9990	-	-	-	12

As equações lineares obtidas das relações σ_p versus Ds apresentam maiores valores de coeficiente angular nos solos com maior quantidade de areia em sua composição (PVAd e LVd) e diminuíram à medida que a quantidade de argila aumenta no solo (LVdf-VG e LVdf-NMT) (Tabela 11). Tais observações indicam que, em solos arenosos, é a condição estrutural ou nível de compactação a variável que mais afeta a capacidade de suporte de carga, enquanto que, em solos argilosos, essa condição perde sua importância, e outras variáveis tornam-se expressivas, como a maior quantidade de argila do LVdf-VG e do LVdf-NMT, que altera as características estruturais e a relação com a retenção de água destes solos se comparado aos solos com maior quantidade de areia em sua composição (PVAd e LVd).

No LVdf-VG e no LVdf-NMT as relações significativas da D_s com a σ_P ocorreram somente em condição de U_v acima da capacidade de campo (amostras equilibradas nas tensões de 6 e 10 kPa) (Figura 19 e Tabela 11). Esse comportamento observado no presente trabalho indica que, em solos argilosos, a condição estrutural (D_s) não é determinante na condição de capacidade de suporte de carga do solo quando a U_v encontra-se na capacidade de campo ou abaixo desta. Nesta condição, possivelmente, o efeito está associado, principalmente, à própria composição (teores de argila e MOS) e umidade desses solos.

Contudo, se considerado o intervalo de confiança (IC) das relações obtidas nas diferentes condições de umidade (Figuras 18 e 19), observa-se que, apesar de apresentar os maiores valores de CV (Tabela 10) dentre as propriedades físico-hídricas avaliadas, a variável independente U_v ocasionou reduzido efeito no comportamento da σ_P , tanto que para o PVAd, o LVdf-VG e o LVdf-NMT, em nenhuma das relações avaliadas (σ_P versus D_s) a umidade apresentou efeito significativo. Contudo, para o LVd, o efeito da U_v foi observado na relação σ_P versus D_s . Para este solo, as amostras com menor quantidade de água apresentaram uma maior capacidade de suporte de carga em toda a faixa de D_s avaliada.

O comportamento observado no LVd indica que, quanto mais seco e compacto estiver o solo, maior será sua capacidade de suporte, pelo fato das partículas e agregados estarem mais coesos, o que proporciona um empacotamento mais denso das partículas e, conseqüentemente, um maior número de pontos de contato entre elas. Em um solo úmido, a água atua como um lubrificante entre as partículas, deixando-o mais macio, alterando seu estado de consistência e, por conseqüência, reduzindo sua capacidade de suporte de carga (REICHERT et al., 2010). Enfim, o comportamento observado indica que cuidados referentes às pressões aplicadas ao solo são importantes, principalmente quando este se encontra com o conteúdo de água acima da capacidade de campo, uma vez que em condições de menor umidade são as forças de coesão entre partículas e agregados do solo que influenciarão na capacidade de suportar cargas.

O I_c reduziu com o aumento da D_s para todos os solos e tensões avaliadas, à exceção do LVdf-NMT, que apresentou relações estatisticamente significativas apenas para as amostras equilibradas nas tensões de 6 e 10 kPa (Figuras 20 e 21 e Tabela 12). Comparativamente aos valores de R^2 observados para a relação da D_s com a variável σ_P , os valores de R^2 foram elevados, principalmente nos solos PVAd

e LVd (arenosos), nos quais a Ds explicou 81,2% (PVAd – 6 kPa) e 96,6% (PVAd – 33 kPa) da variação da capacidade de suporte de carga na faixa de Ds avaliada. Os menores valores de R^2 observados foram no LVdf-VG e LVdf-NMT, sendo que o último não apresentou, inclusive, relação significativa para as tensões de 33 e 100 kPa. Esse comportamento corrobora com o observado nas relações da Ds com a σ_p , o que indica que o efeito da condição estrutural na compressibilidade é maior quando a Uv está acima da capacidade de campo.

Outras pesquisas também observaram o efeito da Ds na susceptibilidade à compactação (DEBIASI et al., 2008; SUZUKI et al., 2008, SAFFIH-HDADI et al., 2009, MENTGES et al., 2013). Em um Argissolo Vermelho Distrófico típico, Debiasi et al. (2008) observaram que o I_c diminuiu linearmente à medida que a Ds elevou, obtendo um R^2 de 0,79. Em Latossolos e Argissolos do Rio Grande do Sul, Suzuki et al. (2008) observaram que, quanto maior a Ds, menor sua susceptibilidade à compactação ($R^2 = 0,77$). A menor susceptibilidade à compactação pode estar associada ao elevado estado de compactação, o qual resulta em menores deformações quando altas pressões são aplicadas, devido ao aumento do número de pontos de contato entre as partículas e os agregados do solo, o que dificulta a movimentação relativa das mesmas (SUZUKI et al., 2008, SAFFIH-HDADI et al., 2009).

Não foi observado um efeito direto da Uv no I_c se considerando o intervalo de confiança (IC) das relações obtidas nas diferentes condições de umidade (Figuras 20 e 21). Em Latossolos com ampla variação textural, Imhoff et al. (2004) não observaram relações significativas entre essas propriedades, enquanto os maiores valores do I_c de um Argissolo Amarelo Coeso ocorreram com maiores conteúdos de água (SILVA; CABEDA, 2006). Segundo Braida et al. (2010), a relação entre o I_c e o conteúdo de água no solo é quadrática, pois ocorre uma Uv em que a compressibilidade é máxima. Isso ocorre porque, à medida que o solo vai umedecendo, a compressibilidade cresce, pois a água reduz a coesão e o atrito entre as partículas. Porém, após atingir um valor máximo, a compressibilidade decresce, pois o excesso de água permite o surgimento de pressões neutras e dessa forma, a deformação ocorre apenas com a expulsão da água do meio poroso.

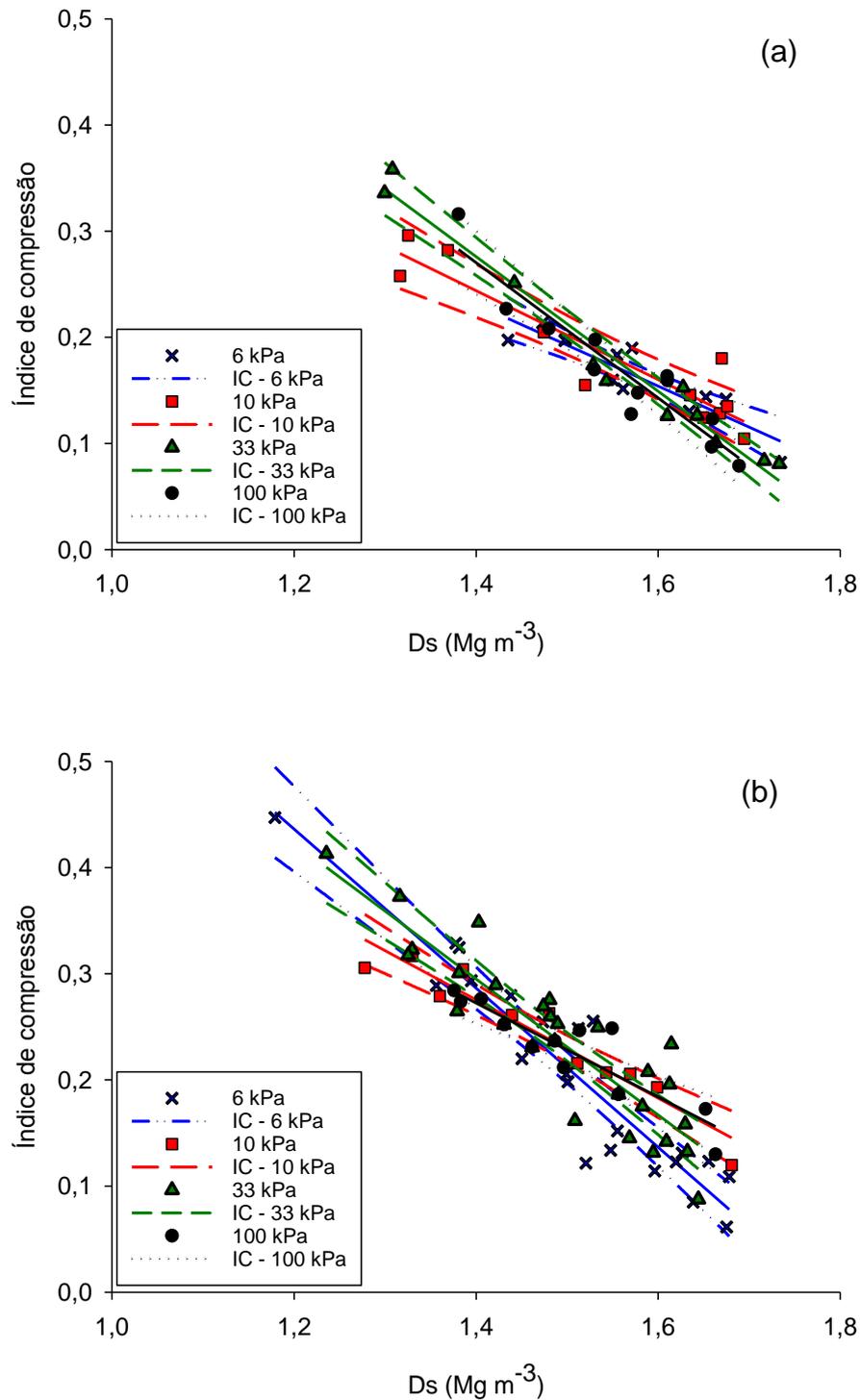


Figura 20 – Relação do índice de compressão com a densidade do solo (D_s) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.

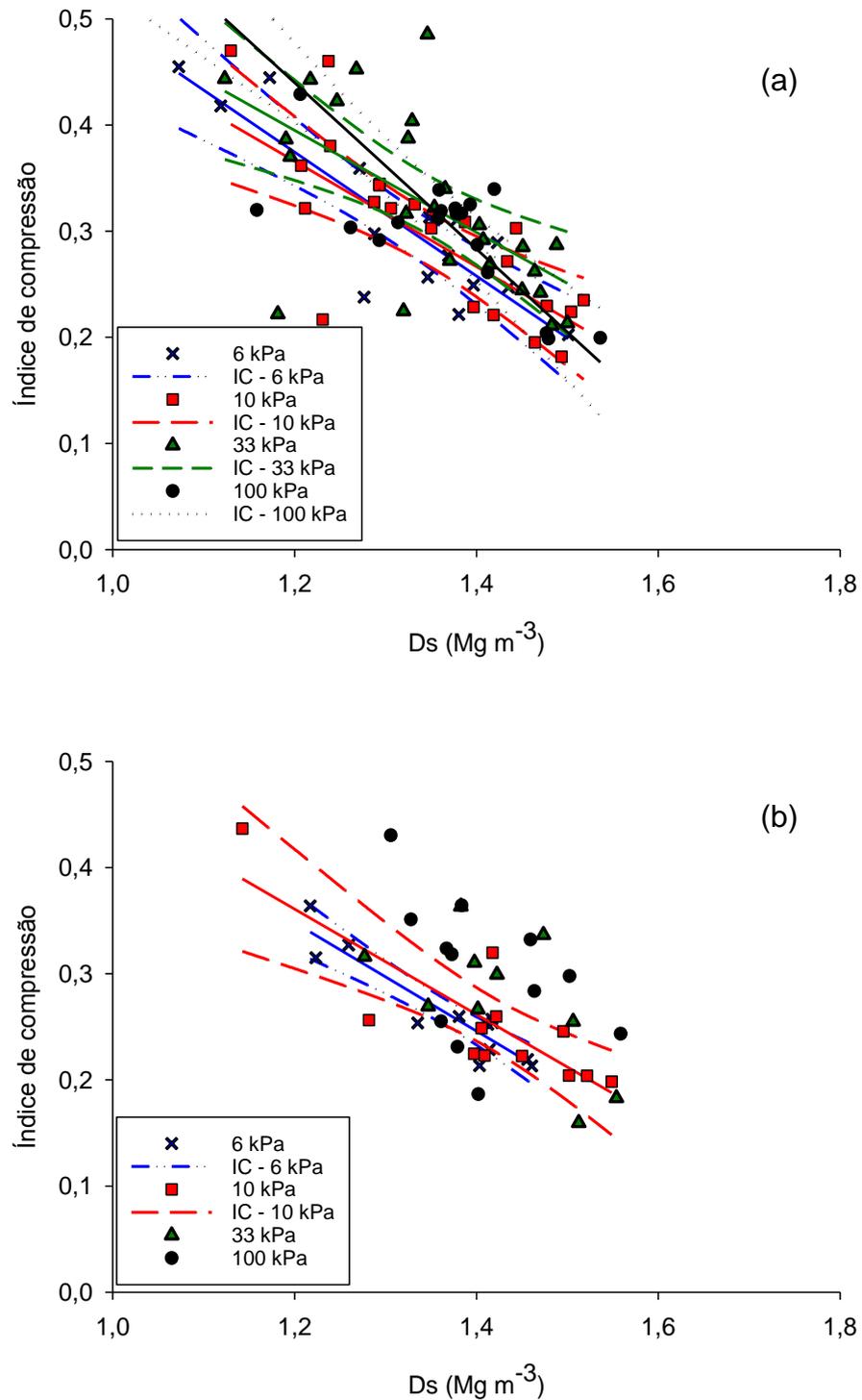


Figura 21 – Relação do índice de compressão com a densidade do solo (D_s) em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.

Tabela 12 – Significância ($Pr > F$), coeficiente angular (a), intercepto (b), coeficiente de determinação (R^2) e população amostral (N) da regressão linear para a variável dependente (VD) “índice de compressão (Ic)” e a variável independente (VI) “densidade do solo (Ds)” dos solos avaliados.

Tensão	VD	VI	Pr > F	a	b	R^2	N
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria							
6	Ic	Ds	<0,0001	-0,3858	0,7713	0,812	12
10	Ic	Ds	<0,0001	-0,4187	0,8300	0,853	11
33	Ic	Ds	<0,0001	-0,6341	1,1636	0,966	11
100	Ic	Ds	<0,0001	-0,6375	1,1628	0,875	12
Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo							
6	Ic	Ds	<0,0001	-0,5218	0,9936	0,827	19
10	Ic	Ds	<0,0001	-0,5784	1,0943	0,825	23
33	Ic	Ds	<0,0001	-0,6404	1,1916	0,813	28
100	Ic	Ds	<0,0001	-0,7496	1,3359	0,887	22
Latossolo Vermelho Distroférrico típico – Victor Graeff							
6	Ic	Ds	<0,0001	-0,5840	1,0754	0,751	15
10	Ic	Ds	0,0002	-0,4971	0,9624	0,460	23
33	Ic	Ds	0,0009	-0,4809	0,9722	0,362	25
100	Ic	Ds	<0,0001	-0,7835	1,3800	0,751	21
Latossolo Vermelho Distroférrico típico - Não-Me-Toque							
6	Ic	Ds	<0,0001	-0,5099	0,9599	0,839	12
10	Ic	Ds	0,0008	-0,4965	0,9567	0,661	12
33	Ic	Ds	0,0515	-	-	-	10
100	Ic	Ds	0,1553	-	-	-	12

Estudos mostram que o teor de argila afeta os parâmetros compressivos do solo, pois o seu incremento ocasiona um aumento no índice de compressão e na capacidade de suporte de carga (IMHOFF et al., 2004; SUZUKI et al., 2008), fato que pode estar associado à capacidade desses em manter maior umidade a maiores tensões. Quando considerada a relação da quantidade de argila com o Ic, esse efeito foi confirmado no presente trabalho, pois, quanto maior a quantidade de argila dos solos, mais suscetíveis a compactação os mesmos foram (Figura 22 e Tabela 13). Contudo, para a relação com a variável σ_p efeito contrário foi observado.

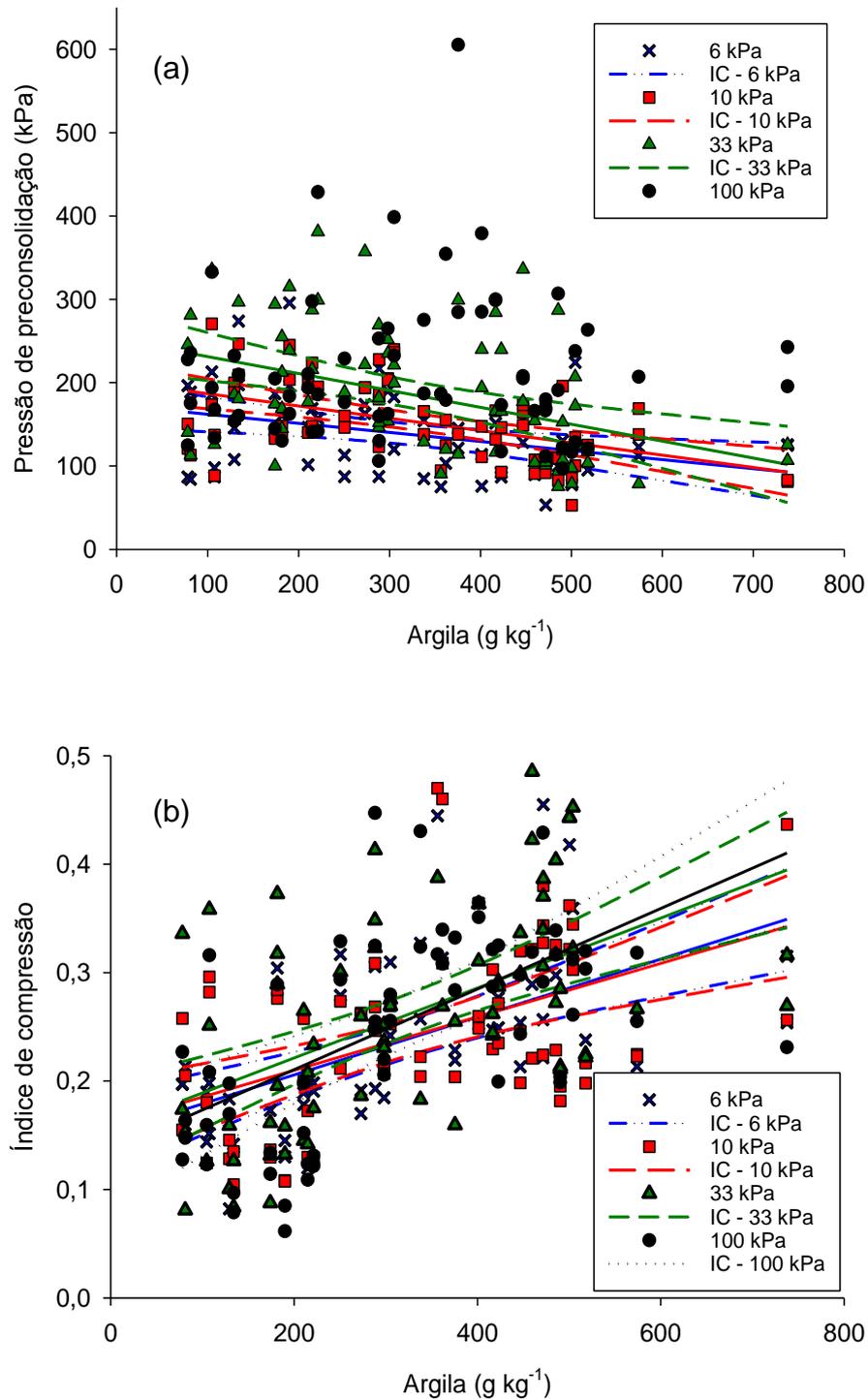


Figura 22 – Relação da pressão de preconsolidação (a) e do índice de compressão (b) com a quantidade de argila em amostras equilibradas nas tensões de 6, 10, 33 e 100 kPa. IC refere-se ao intervalo de confiança para as relações significativas até a probabilidade de 5 % de erro.

Tabela 13 – Significância ($Pr > F$), coeficiente angular (a), intercepto (b), coeficiente de determinação (R^2) e população amostral (N) da regressão linear para as variáveis dependentes (VD) “pressão de preconsolidação (σ_P)” e índice de compressão (I_c)” e a variável independente (VI) “argila” dos solos avaliados.

Tensão	VD	VI	Pr > F	a	b	R^2	N
6	σ_P	Argila	0,0065	-0,10873	172,93380	0,109	44
10	σ_P	Argila	<0,0001	-0,14748	201,45294	0,230	69
33	σ_P	Argila	0,0002	-0,20275	251,50939	0,161	74
100	σ_P	Argila	0,5071	-	-	-	67
6	I_c	Argila	<0,0001	0,00027	0,15182	0,302	44
10	I_c	Argila	<0,0001	0,00025	0,16096	0,224	69
33	I_c	Argila	<0,0001	0,00032	0,15687	0,269	74
100	I_c	Argila	<0,0001	0,00037	0,13587	0,257	67

A capacidade de suporte de carga reduziu à medida que aumentaram os teores de argila no solo. Esse fato corrobora com os comportamentos identificados no LVdf-VG e LVdf-NMT, principalmente em condições de elevada umidade, em que a estrutura dos solos argilosos e, por consequência, a maior capacidade de reter água proporciona uma menor capacidade de suporte de carga do solo. Lembrando que, em solo úmido, a água atua como um lubrificante entre as partículas, deixando-o mais plástico, alterando seu estado de consistência e, por consequência, reduzindo sua capacidade de suporte de carga (REICHERT et al., 2010). No entanto, apesar dessas inferências, os IC não indicaram um efeito significativo das tensões de umidade do solo nos comportamentos supracitados.

Com o intuito de elucidar melhor os efeitos observados nos comportamentos da σ_P e do I_c , foram ajustadas duas equações para a estimativa destas variáveis dependentes (Tabelas 14 e 15). A utilização dos modelos para a estimativa do I_c foi satisfatória. O modelo linear explicou, ao menos, 78,6% (LVdf-VG) da variação da suscetibilidade à compactação, chegando até 87,9% da variação para o PVAd. O modelo adaptado de Busscher estimou, no mínimo, 75,2% da variação do I_c em função da D_s e U_v (LVdf-VG), chegando a valores máximos de 89,1% (PVAd).

As equações lineares ajustadas também contribuíram no entendimento do efeito da U_v no I_c e na σ_P . A variável independente U_v não foi estatisticamente significativa na estimativa do I_c nos solos PVAd e LVd (arenosos), considerada, no entanto, nos solos LVdf-VG e LVdf-NMT (argilosos) (Tabela 15). Na estimativa da

σ_P , foi a variável Ds que não foi considerada para os argilosos, sendo estimada apenas pela variação na umidade, enquanto que, para os solos arenosos, as duas variáveis (Ds e Uv) foram significativas na estimativa da capacidade de suporte de carga (Tabela 14).

Tabela 14 – Equações para a estimativa da pressão de preconsolidação (σ_P) dos solos avaliados, segundo modelos adaptados de Imhoff et al.(2004) e Busscher (1990).

Solo	Modelo	R ²	N
$\sigma_P = a + b \times Ds + c \times Uv$			
PVAd	$\sigma_P = -89,72272^{ns} + 212,39101 \times Ds - 269,17337 \times Uv$	0,235	46
LVd	$\sigma_P = 25,48036^{ns} + 155,81161 \times Ds - 267,60107 \times Uv$	0,138	92
LVdf-VG	$\sigma_P = 299,86215 - 448,18565 \times Uv$	0,229	84
LVdf-NMT	$\sigma_P = 602,53814 - 1285,32363 \times Uv$	0,387	46
$\sigma_P = a \times Ds^b \times Uv^c$			
PVAd	$\sigma_P = 47,02669 \times Ds^{1,781511} \times Uv^{-0,35826}$	0,205	46
LVd	$\sigma_P = 84,9214 \times Ds^{1,115569} \times Uv^{-0,25924}$	0,129	92
LVdf-VG	$\sigma_P = 26,39057 \times Ds^{0,712457} \times Uv^{-1,35623}$	0,355	84
LVdf-NMT	$\sigma_P = 7,556656 \times Ds^{1,390658} \times Uv^{-2,32562}$	0,486	46

Ds = densidade do solo (Mg m⁻³); Uv = umidade volumétrica do solo (m³ m⁻³); a, b e c = coeficientes de ajuste dos modelos; R² = coeficiente de determinação da equação ajustada; N = número de pares utilizados para o ajuste da equação.

Tabela 15 – Equações para a estimativa do índice de compressão (Ic) dos solos avaliados, segundo modelos adaptados de Imhoff et al.(2004) e Busscher (1990).

Solo	Modelo	R ²	N
$Ic = a + b \times Ds + c \times Uv$			
PVAd	$Ic = 1,00883 - 0,53615 \times Ds$	0,879	46
LVd	$Ic = 1,14256 - 0,63061 \times Ds$	0,831	92
LVdf-VG	$Ic = 1,47323 - 0,68612 \times Ds - 0,67382 \times Uv$	0,786	84
LVdf-NMT	$Ic = 1,34604 - 0,57204 \times Ds - 0,82883 \times Uv$	0,808	46
$Ic = a \times Ds^b \times Uv^c$			
PVAd	$Ic = 0,860589 \times Ds^{-4,16437} \times Uv^{-0,116}$	0,891	46
LVd	$Ic = 1,215836 \times Ds^{-3,63015} \times Uv^{0,193336}$	0,794	92
LVdf-VG	$Ic = 0,340563 \times Ds^{-2,54012} \times Uv^{-0,59694}$	0,752	84
LVdf-NMT	$Ic = 0,244445 \times Ds^{-2,54588} \times Uv^{-0,8394}$	0,786	46

Ds = densidade do solo (Mg m⁻³); Uv = umidade volumétrica do solo (m³ m⁻³); a, b e c = coeficientes de ajuste dos modelos; R² = coeficiente de determinação da equação ajustada; N = número de pares utilizados para o ajuste da equação.

Combinando esse comportamento e o observado nas Figuras 18, 19, 20, 21 e 22 e nas Tabelas 11, 12 e 13, é possível inferir que, na suscetibilidade à compactação de solos arenosos, a U_v possui reduzida influência, estando sua intensidade relacionada, principalmente, à estrutura do solo (D_s). Contudo, em solos argilosos, em função da maior capacidade de retenção de água, o efeito da umidade se sobressai em relação à D_s e atua no aumento da suscetibilidade à compactação a medida que o conteúdo de água aumenta no solo.

Apesar de ser estatisticamente significativa, os valores de R^2 foram baixos quando foi estimada a σ_p (Tabela 14). O modelo linear estimou somente 38,7% da σ_p para o LVdf-NMT e apenas 13,8% para o LVd. O modelo adaptado de Busscher estimou, no mínimo, 12,9% da variação do σ_p em função da D_s e U_v (LVd), chegando a valores máximos de R^2 de 0,486 (LVdf-NMT). Essa baixa capacidade dos dados ajustados remetem às baixas relações observadas entre a variável dependente σ_p e as variáveis D_s e U_v (Figura 13 e Tabela 11). Em seu trabalho, Severiano et al. (2010) utilizaram o modelo de Buscher para a estimativa da σ_p em um Latossolo Vermelho-Amarelo e tiveram um R^2 de 0,87; contudo, a D_s teve pouca variação se comparada ao nosso presente estudo. Goulart (2012), em um Latosso Vermelho Distroférrico sob diferentes níveis de compactação, obteve um ajuste máximo para a σ_p de 50% e 55%, respectivamente, para o modelo linear adaptado de Imhoff et al. (2004) e o modelo adaptado de Busscher.

A variação da U_v ao longo do ciclo de cultivo da soja para os solos em estudo esta disposta no gráfico “b” das Figuras 23, 24, 25 e 26. Para o PVAd, em que as D_s dos pontos avaliados possuem valores semelhantes, houveram reduzidas diferenças quanto aos valores observados de U_v ao longo do ciclo de cultivo (Figura 23b). Para as duas condições de D_s , a U_v variou entre condição de U_{vCC} e $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Entre os 15 e 30 dias após a emergência (DAE) o solo esteve com um maior conteúdo de água, apresentou uma variação mais intensa entre os 50 e 60 DAE e, ao final do ciclo (100 a 119 DAE), apresentou novamente um período em que a U_v encontrava-se alta, condição essa refletida em função da maior precipitação ocorrida neste período (Figura 23a). Entre os 80 e 100 DAE, houve um período em que a U_v foi menor, com valores próximos a $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

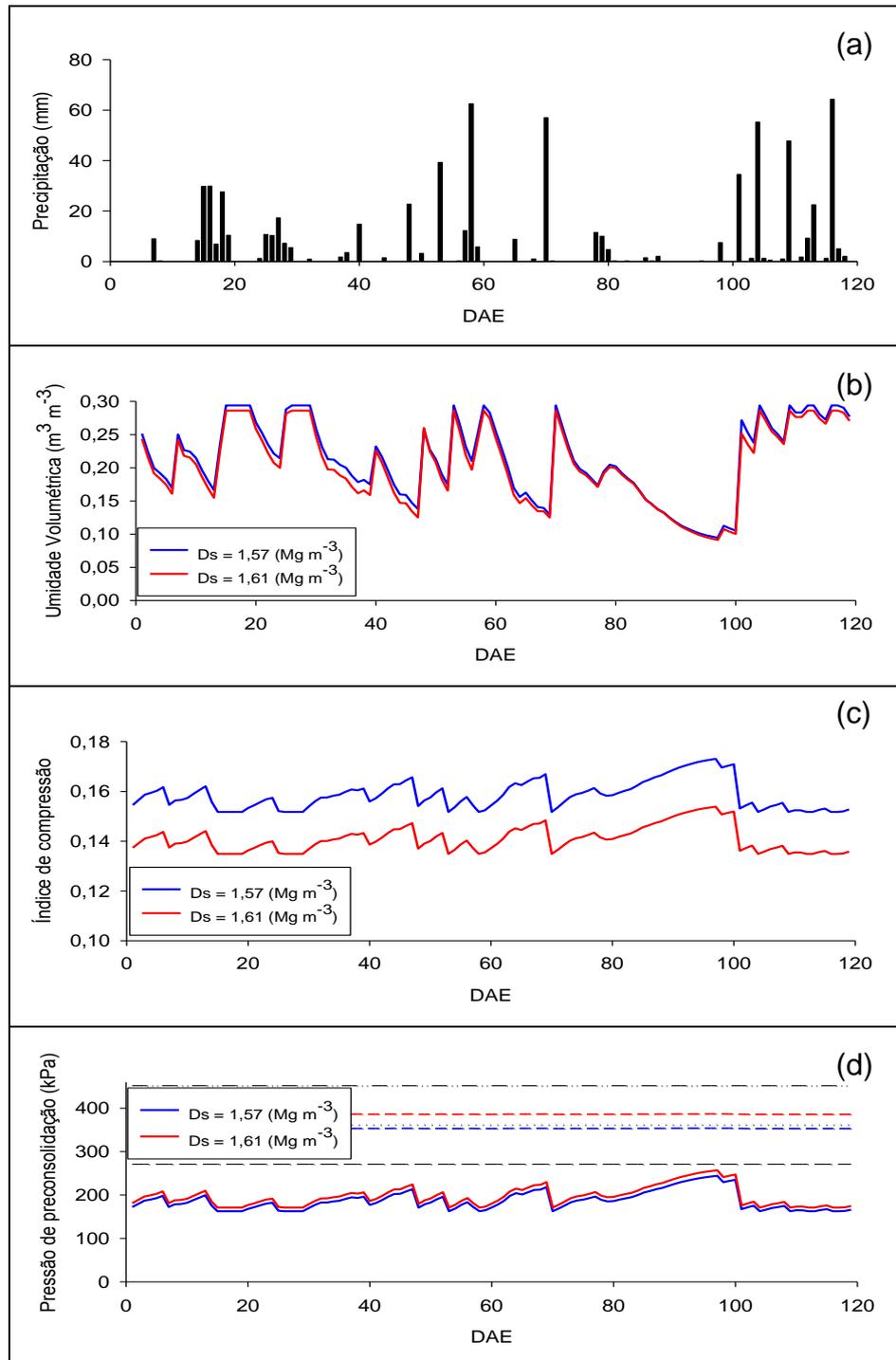


Figura 23 – Precipitação (a), umidade volumétrica (b), índice de compressão (c) e pressão de preconsolidação em duas condições de densidade do solo ao longo do ciclo da soja em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, Santa Maria/RS. As linhas tracejadas nas cores azul e vermelha referem-se ao limite superior do intervalo de confiança da pressão de preconsolidação. - - - - - representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Trator Massey Ferguson 275 4x2 TDA; representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Colhedora de cereais John Deere 1175 4x2; - · - · - · - representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Pulverizadores Autopropelido UNIPORT Jacto 4x2 (CARDOSO, 2007).

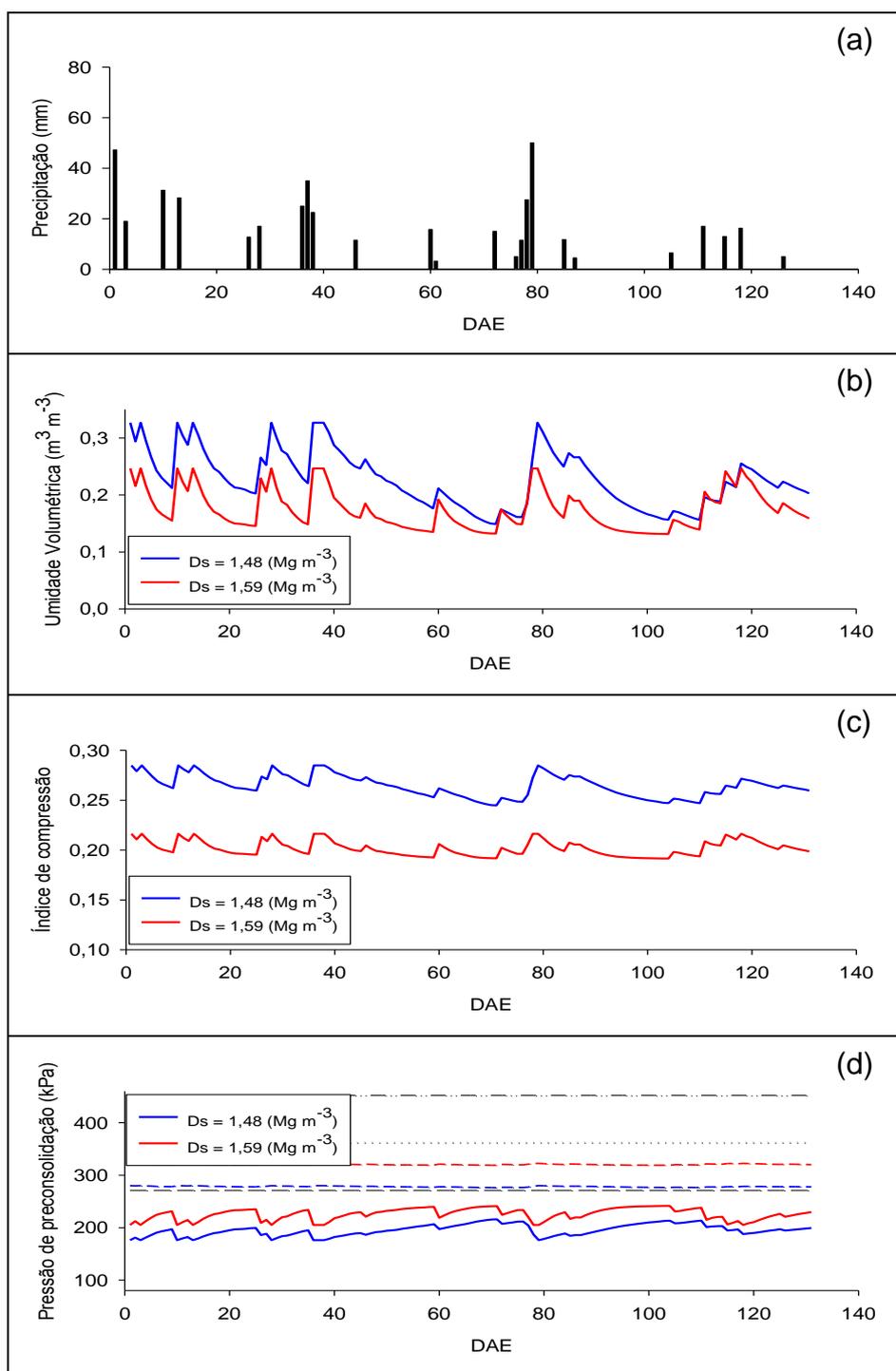


Figura 24 – Precipitação (a), umidade volumétrica (b), índice de compressão (c) e pressão de preconsolidação em duas condições de densidade do solo ao longo do ciclo da soja em um Latossolo Vermelho Distrófico típico, Passo Fundo/RS. As linhas tracejadas nas cores azul e vermelha referem-se ao intervalo de confiança da pressão de preconsolidação. ——— representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Trator Massey Ferguson 275 4x2 TDA; representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Colhedora de cereais John Deere 1175 4x2; - - - - - representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Pulverizados Autopropelido UNIPORT Jacto 4x2 (CARDOSO, 2007).

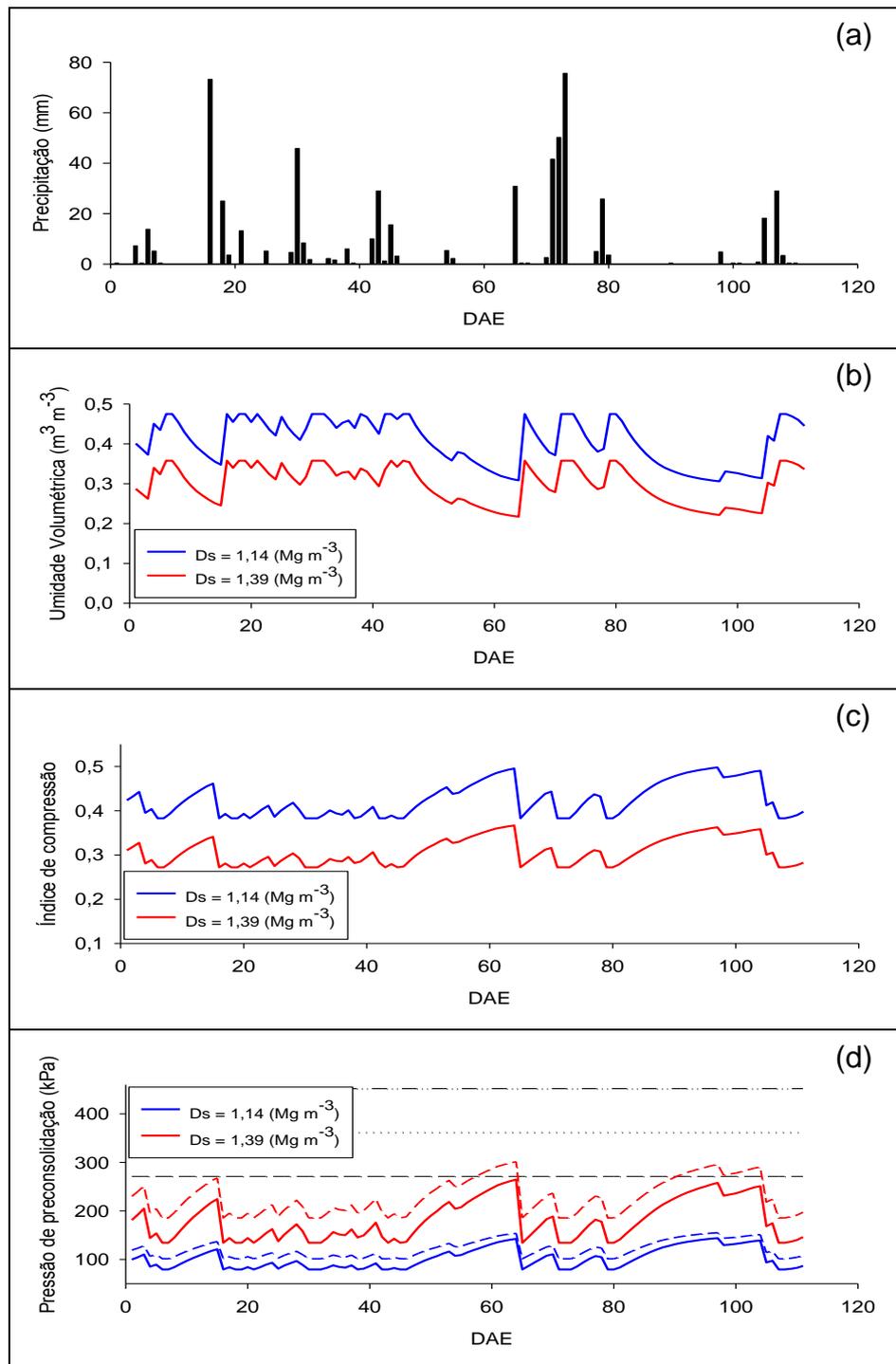


Figura 25 – Precipitação (a), umidade volumétrica (b), índice de compressão (c) e pressão de preconsolidação em duas condições de densidade do solo ao longo do ciclo da soja em um Latossolo Vermelho Distroférico típico, Victor Graeff/RS. As linhas tracejadas nas cores azul e vermelha referem-se ao intervalo de confiança da pressão de preconsolidação. ----- representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Trator Massey Ferguson 275 4x2 TDA; representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Colhedora de cereais John Deere 1175 4x2; - - - - - significa a a pressão de contato pneu/solo exercida por um Pulverizados Autopropelido UNIPORT Jacto 4x2 (CARDOSO, 2007).

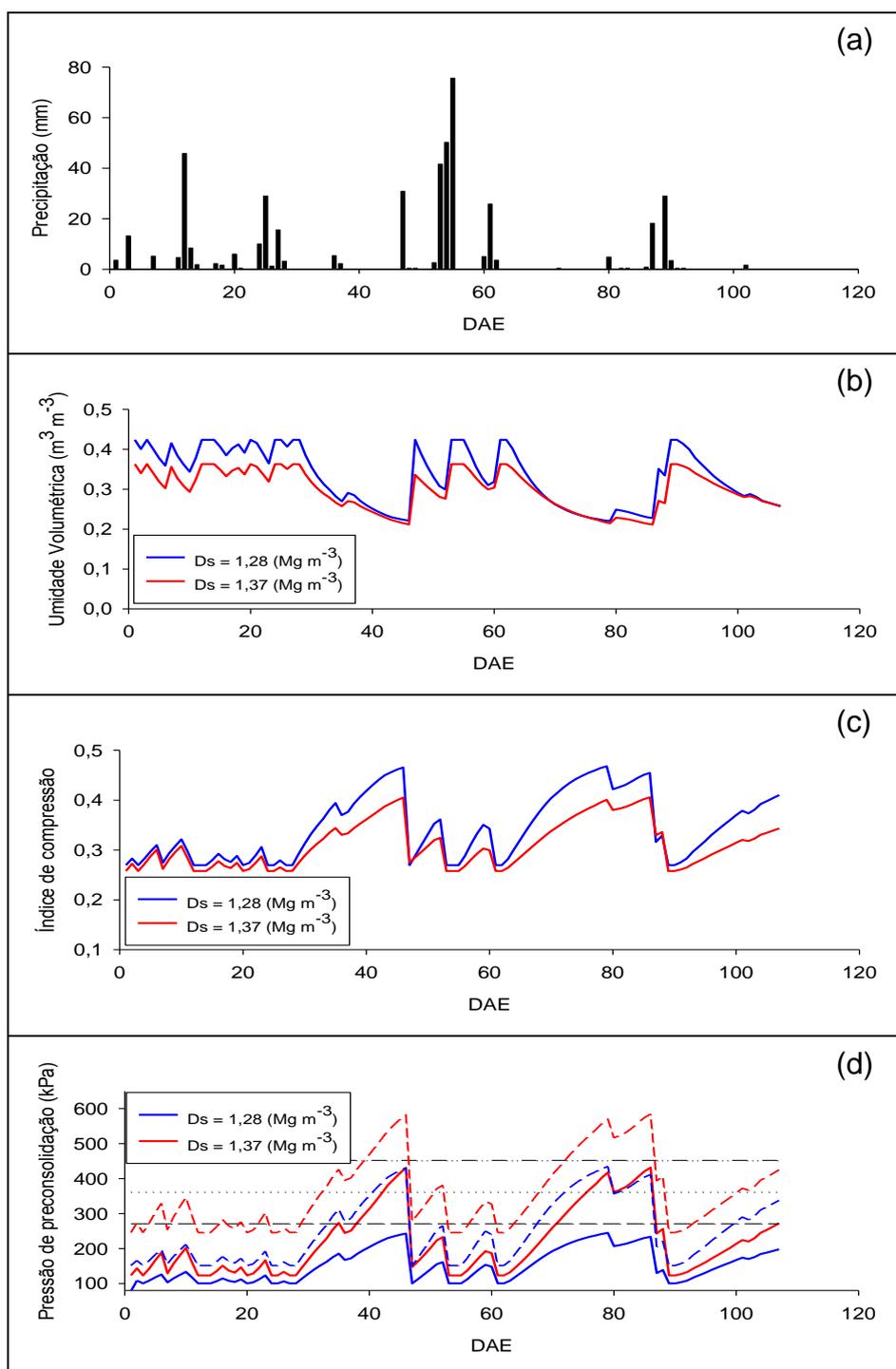


Figura 26 – Precipitação (a), umidade volumétrica (b), índice de compressão (c) e pressão de preconsolidação em duas condições de densidade do solo ao longo do ciclo da soja em um Latossolo Vermelho Distroférico típico, Não-Me-Toque/RS. As linhas tracejadas nas cores azul e vermelha referem-se ao intervalo de confiança da pressão de preconsolidação. ----- representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Trator Massey Ferguson 275 4x2 TDA; representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Colhedora de cereais John Deere 1175 4x2; -.-.-.-.- representa a pressão de contato pneu/solo exercida por um Pulverizados Autopropelido UNIPORT Jacto 4x2 (CARDOSO, 2007).

No solo LVd, as diferentes condições de Ds ocasionaram uma diferença na porosidade total e na U_{VCC} (Tabela 5), com reflexos nos valores de Uv estimados ao longo do ciclo de cultivo. Em média, foi observada uma diferença de $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ entre as duas condições de Ds (Figura 24b). Comparativamente ao PVAd, os períodos em que a Uv estava alta foram menores, condição explicada em parte pelo menor precipitação ocorrida (Figura 24a). Em média, os valores de Uv variaram de $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, no ponto com Ds média de $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$, e de $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, no ponto com Ds média de $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$. Ao longo do ciclo, ocorreram dois períodos em que o solo se encontrava mais seco (entre 40 e 75 DAE e entre 100 e 115 DAE), com conteúdo de água próximo a $U_{V_{PMP}}$.

A variação da Uv ao longo do ciclo de cultivo no LVdf-VG é apresentada na Figura 25b. As alterações da condição de compactação nesse solo ocasionaram uma diferença média de Uv de $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ entre as duas condições de Ds. Comparativamente ao PVAd e ao LVd, a maior quantidade de argila nesse solo (Tabela 2), associada a melhor distribuição da precipitação no período (Figura 25a), ocasionou uma menor amplitude nos valores da Uv, que oscilaram, em média, de $0,47 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o ponto com Ds média de $1,14 \text{ Mg m}^{-3}$ e $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no ponto com Ds média de $1,39 \text{ Mg m}^{-3}$. Nos dois pontos avaliados houve um período, compreendido entre os 50 e 65 DAE e os 85 e 105 DAE em que a Uv encontrava-se menor, estando próximo à $U_{V_{PMP}}$ para o local com condição de Ds de $1,39 \text{ Mg m}^{-3}$.

No LVdf-NMT, um comportamento semelhante na variação da Uv em comparação ao LVdf-VG foi observado, com valores oscilando entre $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o ponto com Ds média de $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$ e de $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o ponto de Ds de $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$. A diferença média na Uv entre as duas faixas de Ds foi de $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. A Uv manteve-se alta na maior parte do tempo, com apenas dois períodos (dos 30 aos 50 DAE e dos 70 a 90 DAE) com baixo conteúdo de água, estando inclusive próximo à $U_{V_{PMP}}$.

No LVdf-NMT, um comportamento semelhante na variação da Uv em comparação ao LVdf-VG foi observado, com valores oscilando entre $0,42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o ponto com Ds média de $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$ e de $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,31 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o ponto de Ds de $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$. A diferença média na Uv entre as duas faixas de Ds foi de $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. A Uv manteve-se alta na maior parte do tempo, com

apenas dois períodos (dos 30 aos 50 DAE e dos 70 a 90 DAE) com baixo conteúdo de água, estando inclusive próximo à U_{VPMP} (Figura 26b).

A variável dependente I_c mostrou-se sensível à variação da D_s e da U_v ao longo de um ciclo de cultivo (Figuras 23c, 24c, 25c e 26c). Em cada solo, os locais com menor D_s foram menos suscetíveis à compactação, sendo os motivos já abordados quando da discussão dos efeitos da D_s no I_c . O I_c também variou ao longo do tempo em função da U_v . Contudo, exceto para o LVd, essa variação estimada pelo modelo adaptado de Busscher foi incoerente, uma vez que o aumento na U_v ocasionou uma redução na suscetibilidade à compactação.

Para a estimativa da σ_P o modelo mostrou-se coerente (Figuras 23d, 24d, 25d e 26d). O aumento na U_v reduziu a capacidade de suporte de carga. Embora o modelo tenha apresentado uma baixa capacidade de ajuste aos pares de dados (Tabela 14), foi possível observar que, ao longo do ciclo, maiores valores de σ_P ocorreram à medida que a U_v do solo reduzia. Exceto para o PVAd, em que as diferenças da D_s entre os pontos avaliados foram mínimas, para os demais solos foi possível observar que, quanto maior a D_s , maior a capacidade de suportar cargas, condição já discutida anteriormente.

Nos gráficos que apresentam a variação da σ_P ao longo dos ciclos de cultivo, foram plotadas retas que representam a pressão máxima exercida ao solo por um trator, uma colhedora de grãos e um pulverizador autopropelido (CARDOSO, 2007), máquinas essas utilizadas para o cultivo de soja. Considerando os valores médios de σ_P observados no PVAd nas faixas de D_s já abordadas, em qualquer momento do cultivo o tráfego das máquinas agrícolas citadas causará compactação do solo (Figura 23d). Contudo, o baixo ajuste do modelo (R^2 de 0,205) exige cuidados quanto a essa inferência. No entanto, se for considerado o limite superior do intervalo de confiança (IC), apenas o pulverizador causaria uma compactação no solo, esta independente da condição de U_v .

Para o LVd, se for considerado o limite superior do IC, somente o tráfego do trator não causaria compactação adicional, enquanto que, considerando o valor médio, todas as máquinas teriam efeitos negativos da estrutura do solo (Figura 24d). Nos solos LVdf-VG e LVdf-NMT, nos quais o modelo apresentou um melhor ajuste (R^2 de 0,355 e 0,486, respectivamente), os valores de σ_P apresentaram maior variação ao longo dos ciclos de cultivo (Figuras 25d e 26d). O valor médio máximo estimado foi de 432 kPa para a condição de maior D_s no LVdf-NMT, momento esse

em que a Uv estava próxima ao ponto de murcha permanente (aproximadamente aos 50, 70 e 90 DAE). Nesses períodos, somente o pulverizador causaria compactação adicional ao solo.

Se forem considerados os valores médio da σ_P ao longo do ciclo para o LVdf-VG, novamente o tráfego de todas as máquinas causaria compactação adicional, condição esta que também ocorrerá em praticamente todo o período de cultivo se considerado o limite superior do IC. Nessa condição, apenas em alguns dias ao longo do ciclo, a capacidade de suporte de carga será maior que as pressões aplicadas pelas máquinas (independentemente das condições de Ds consideradas). Contudo, considerando o limite superior do IC, no LVdf-NMT o pulverizador causaria compactação adicional sempre que fosse trafegar o ponto com menor Ds, enquanto que os demais implementos superariam a capacidade de suporte de carga apenas em alguns dias. Para o ponto com maior Ds, o trator e a colhedora causariam compactação adicional poucos dias e o autopropelido como maior frequência, somente não causando compactação adicional quando o solo estiver com o conteúdo de água próximo ao ponto de murcha permanente.

5.3 Permeabilidade do solo ao ar

Na Tabela 16 são apresentados os valores mínimos, médios e máximos, além do desvio padrão e do coeficiente de variação (CV) das variáveis independentes consideradas como efetivas no comportamento da Ka. Duas variáveis relacionadas com a estrutura do solo foram consideradas: a Ds e a Pt. O menor e o maior valor do CV para a variável independente Ds foram observados, respectivamente, no LVd (6,14 %) e no LVdf-VG (6,68 %). Os valores mínimos de Ds observados foram de 1,03 Mg m⁻³ para o LVdf-VG; 1,07 Mg m⁻³ para o LVdf-NMT; 1,23 Mg m⁻³ para o LVd e 1,24 para o PVAd, enquanto que os valores máximos foram de 1,50 Mg m⁻³ para o LVdf-NMT; 1,53 Mg m⁻³ para o LVdf-VG; 1,70 Mg m⁻³ para o LVd e 1,77 Mg m⁻³ para o PVAd. Para a Pt, os valores obtidos do CV foram superiores aos valores obtidos para a Ds, com exceção do LVdf-VG. O menor CV para essa variável foi apresentado pelo solo LVdf-NMT (7,34 %) e o maior CV foi observado no PVAd (10,44 %).

Tabela 16 – Valor mínimo, médio e máximo, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) da densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), umidade volumétrica (Uv), porosidade de aeração (Ea) e continuidade de poros [$\log_{10}(k1+1)$] dos solos avaliados.

Variável	Mínimo	Médio	Máximo	DP	CV (%)
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria					
Ds (MG m ⁻³)	1,24	1,58	1,77	0,10	6,36
Pt (m ³ m ⁻³)	0,282	0,356	0,475	0,037	10,44
Uv (m ³ m ⁻³)	0,195	0,268	0,405	0,050	18,78
Ea (m ³ m ⁻³)	0,006	0,088	0,195	0,049	55,89
$\log_{10}(K1+1)$ (μm ²)	0,00	1,78	2,88	0,69	38,70
Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo					
Ds (MG m ⁻³)	1,23	1,52	1,70	0,09	6,14
Pt (m ³ m ⁻³)	0,296	0,386	0,525	0,040	10,39
Uv (m ³ m ⁻³)	0,152	0,281	0,414	0,055	19,41
Ea (m ³ m ⁻³)	0,001	0,105	0,297	0,055	52,16
$\log_{10}(K1+1)$ (μm ²)	0,00	1,96	3,02	0,68	34,81
Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff					
Ds (MG m ⁻³)	1,03	1,28	1,53	0,11	8,68
Pt (m ³ m ⁻³)	0,417	0,504	0,597	0,038	7,54
Uv (m ³ m ⁻³)	0,272	0,400	0,540	0,059	14,70
Ea (m ³ m ⁻³)	0,011	0,104	0,231	0,052	49,46
$\log_{10}(K1+1)$ (μm ²)	0,00	1,59	2,56	0,70	43,97
Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque					
Ds (MG m ⁻³)	1,07	1,34	1,50	0,09	6,99
Pt (m ³ m ⁻³)	0,410	0,472	0,567	0,035	7,34
Uv (m ³ m ⁻³)	0,250	0,369	0,497	0,057	15,38
Ea (m ³ m ⁻³)	0,005	0,103	0,277	0,049	47,29
$\log_{10}(K1+1)$ (μm ²)	0,00	1,63	2,55	0,63	38,44

A aplicação das diferentes tensões nas amostras, antes da realização dos testes de Ka, proporcionou diferentes condições de Uv, com CV que oscilaram entre 14,70 % (LVdf-VG) e 19,41 % (LVd) (Tabela 16). O menor valor de Uv foi observado no LVd (0,152 m³ m⁻³) e o maior no LVdf-VG (0,540 m³ m⁻³). A Ea, parâmetro afetado pela estrutura e pelo conteúdo de água no solo, foi a variável independente com os maiores valores de CV observados: 55,89 % para o PVAd; 52,16 % para o LVd; 49,46 % para o LVdf-VG e 47,29 % para o LVdf-NMT. O LVd apresentou a menor (0,001 m³ m⁻³) e a maior (0,297 m³ m⁻³) condição de Ea. A K1 apresentou valores de CV entre 34,81 % e 43,97 %. Em todos os solos ocorreram amostras que não apresentaram continuidade dos poros. Os maiores valores de K1 foram encontrados nos solos arenosos (3,02 μm² para o LVd e 2,88 μm² para o PVAd) e os menores, nos argilosos (2,56 μm² para o LVdf-VG e 2,55 μm² para o LVdf-NMT).

As relações da Ea com a Uv estão apresentadas na Figura 27 e 28. A Ea apresentou uma relação inversamente proporcional e significativa com a Uv para

todos os solos e classes de Ds avaliadas, ou seja, à medida que aumenta o conteúdo de água no solo uma menor E_a é observada. Efeito semelhante da U_v foi observado no comportamento da K_1 (Figuras 29 e 30), sendo que menores condições de U_v proporcionam uma maior continuidade de poros. No entanto, essa relação somente foi significativa para todas as classes de Ds nos solos LVd e LVdf-VG e nas classes Ds2 e Ds3 para o PVAd, enquanto que, para o solo LVdf-NMT, nenhuma relação significativa foi observada.

O efeito da U_v no comportamento da K_a está apresentado nas Figuras 31 e 32. Menores valores U_v proporcionaram maiores K_a para todos os solos e classes de Ds avaliadas, com exceção do LVdf-NMT, que não apresentou relação significativa para a classe de amostras com maior Ds (Ds3). O efeito da K_1 na K_a foi significativo e diretamente proporcional para todas os solos e classe de Ds avaliadas (Figuras 33 e 34).

A dispersão dos dados na relação K_a versus U_v para todos os solos e, por consequência, os baixos valores dos R^2 obtidos para as equações lineares ajustadas, indicam que a U_v não exerce elevado efeito sobre o comportamento da K_a , tanto que, para o LVdf-NMT, não houve uma relação significativa quando amostras com Ds elevada (classe Ds3) foram consideradas (Figuras 31 e 32). No entanto, a exceção foi a classe Ds1 para o LVd, em que o R^2 obtido para essa relação foi de 0,75. Esse comportamento sugere que, para solos arenosos e, principalmente, com baixos valores de Ds (ou não compactados), a U_v poderia influenciar de maneira mais significativa a K_a e que essa seria menor em solos com maior quantidade de argila em sua composição. De fato as avaliações realizadas nos solos argilosos, especialmente o LVdf-NMT, apresentaram uma baixa relação entre a K_a e a U_v , indicando esse efeito reduzido ou então indireto da U_v nos fluxos de ar no solo. Porém, para o PVAd, solo que apresenta a menor quantidade de argila (Tabela 2), os valores de R^2 observados também foram baixos.

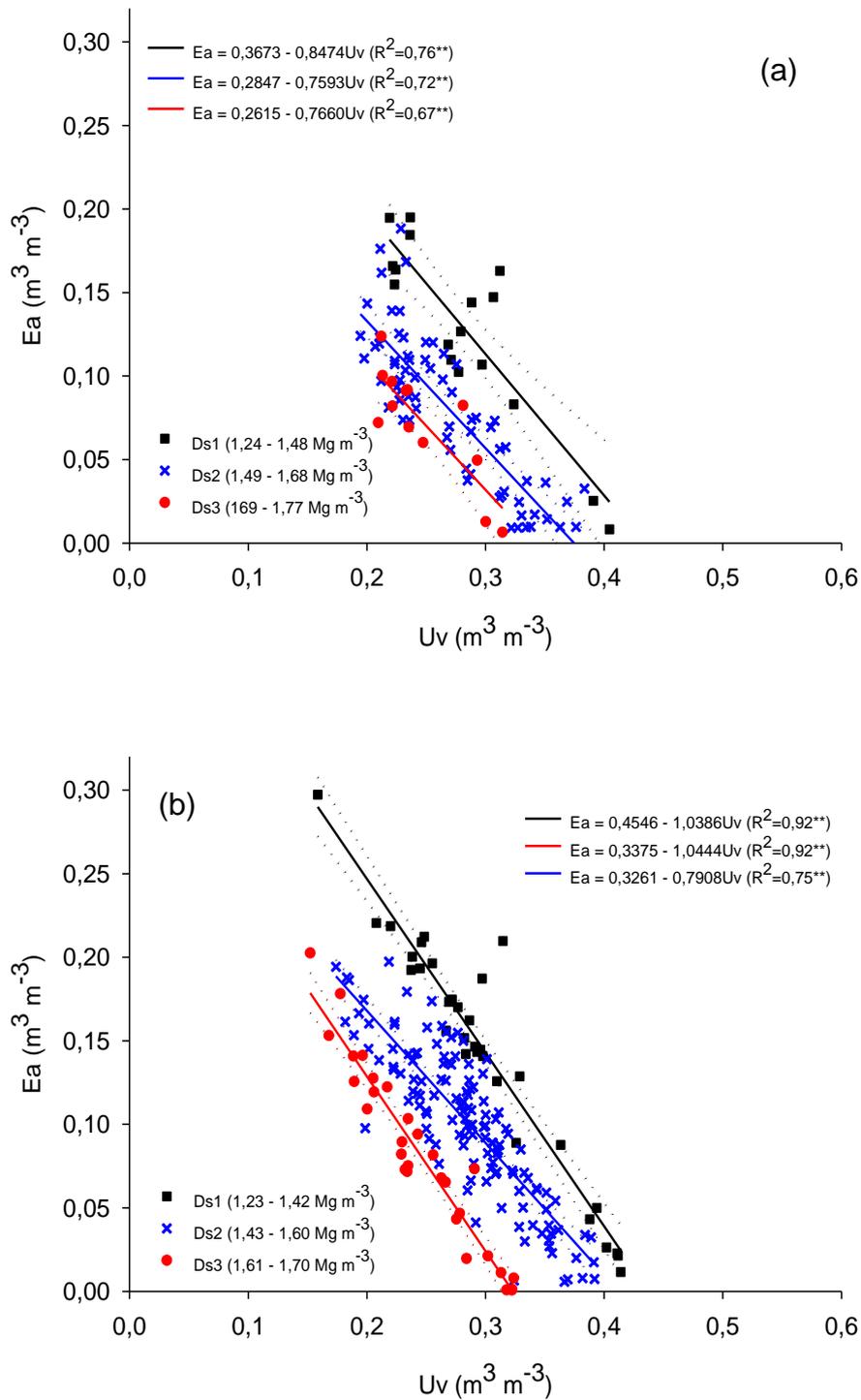


Figura 27 – Relação da porosidade de aeração (Ea) com a umidade volumétrica (Uv) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5 % (*) e 1% (**) de erro.

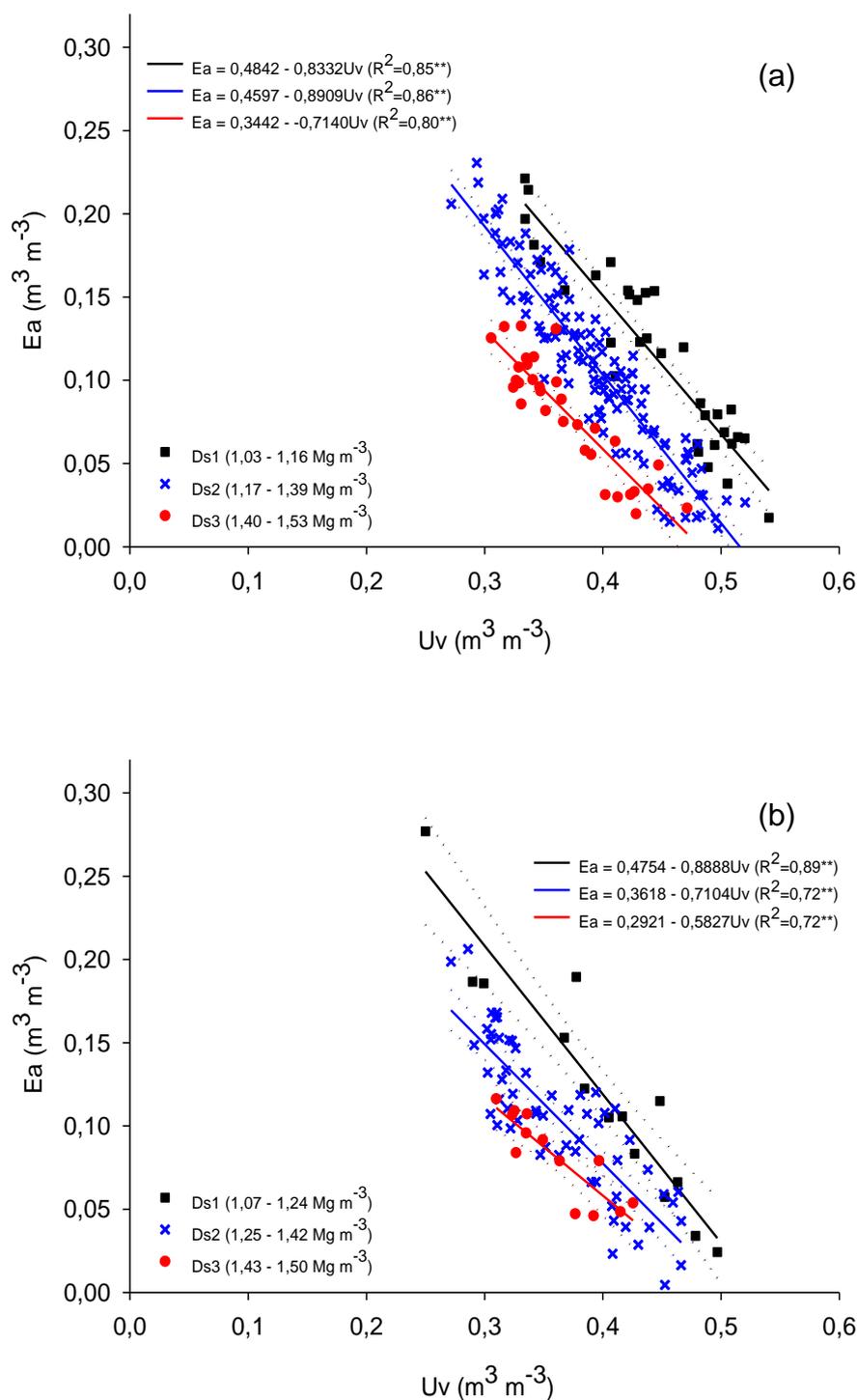


Figura 28 – Relação da porosidade de aeração (E_a) com a umidade volumétrica (U_v) em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e um Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5% (*) e 1% (**) de erro.

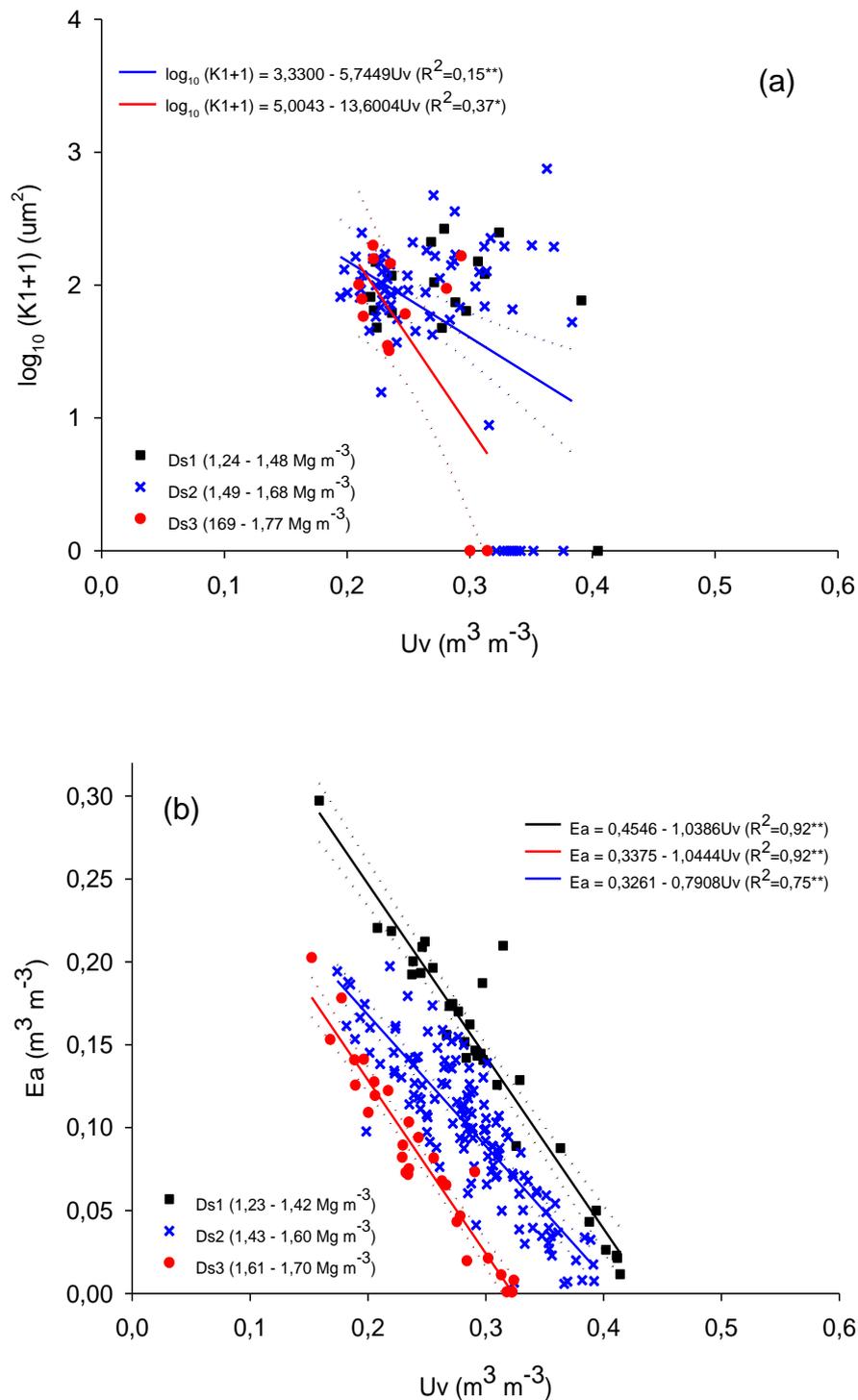


Figura 29 – Relação da continuidade de poros [$\log_{10}(K1+1)$] com a umidade volumétrica (Uv) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5% (*) e 1% (**) de erro.

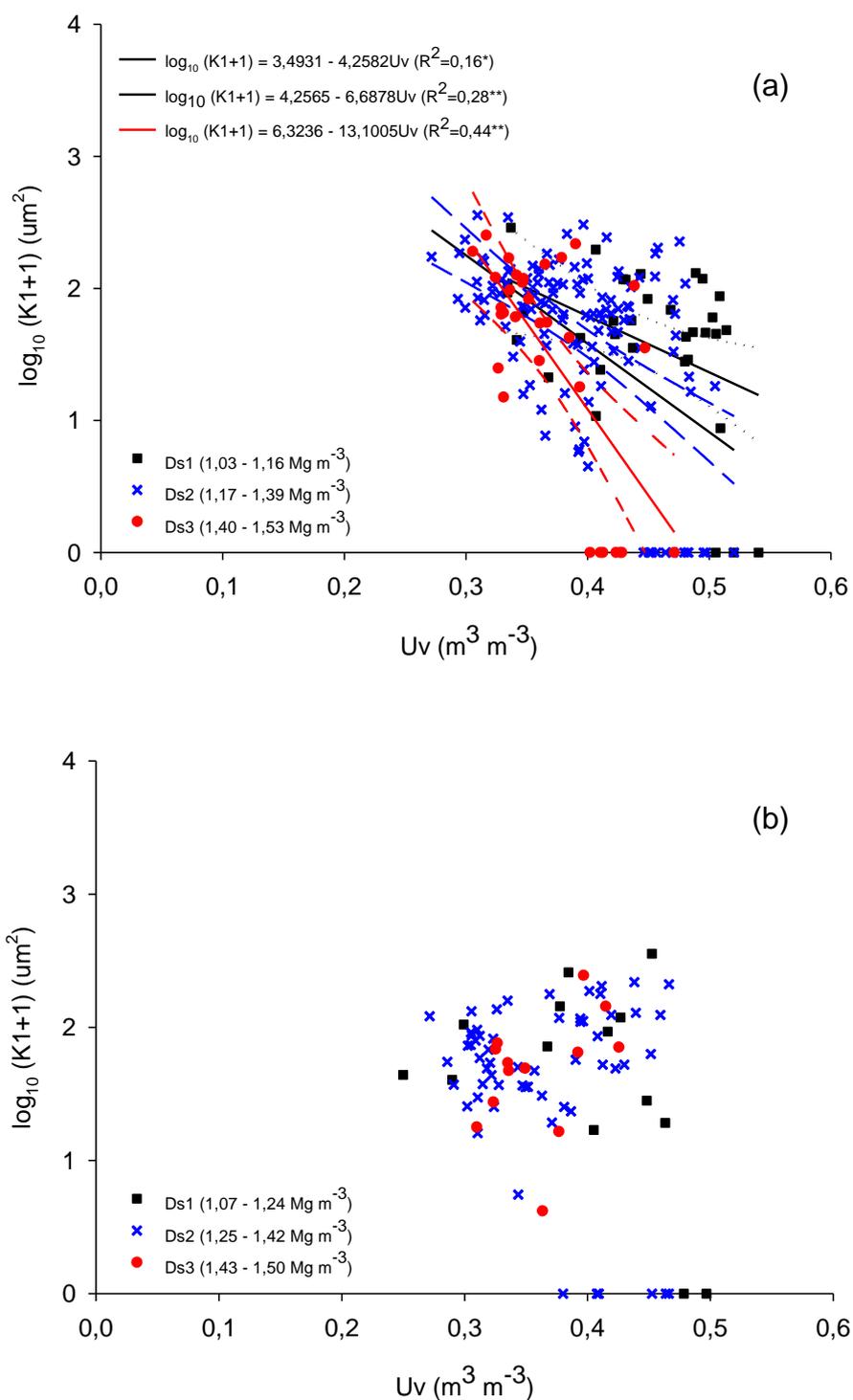


Figura 30 – Relação da continuidade de poros [$\log_{10}(K1+1)$] com a umidade volumétrica (Uv) em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e um Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5 % (*) e 1% (**) de erro.

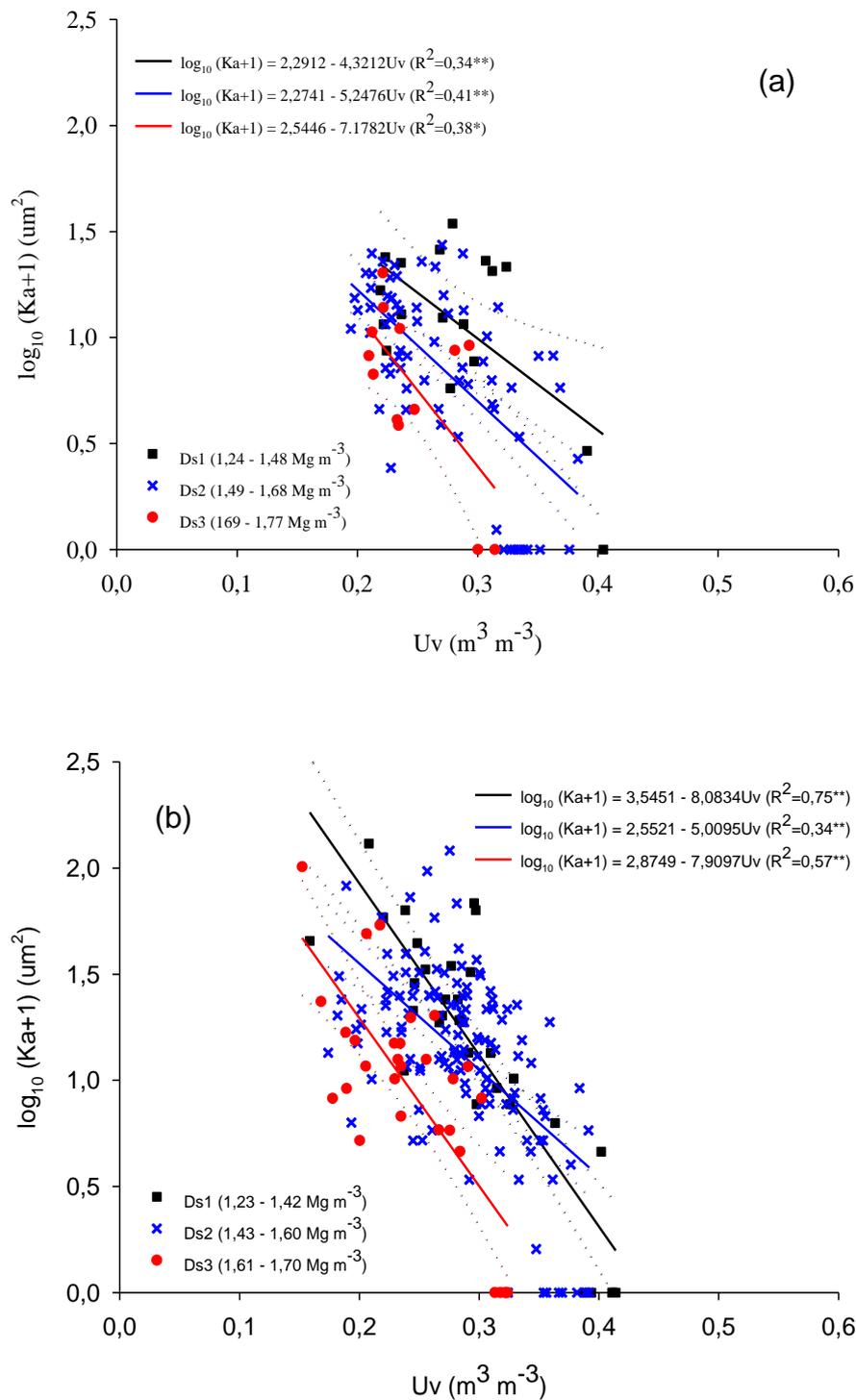


Figura 31 – Relação da permeabilidade ao ar [$\log_{10}(Ka+1)$] com a umidade volumétrica (Uv) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5% (*) e 1% (**) de erro.

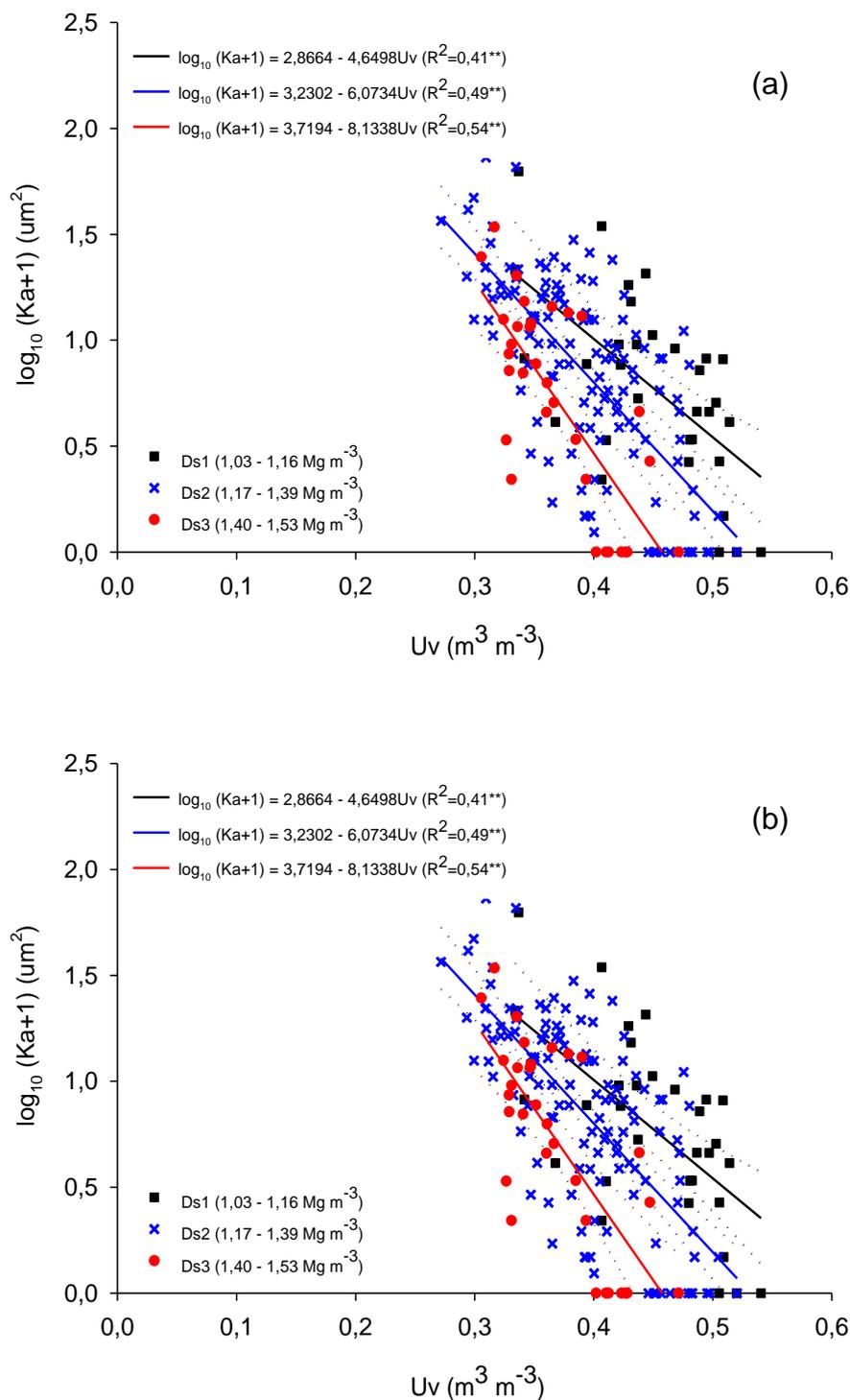


Figura 32 – Relação da permeabilidade ao ar $[\log_{10} (Ka+1)]$ com a umidade volumétrica (U_v) em um Latosolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e um Latosolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5 % (*) e 1% (**) de erro.

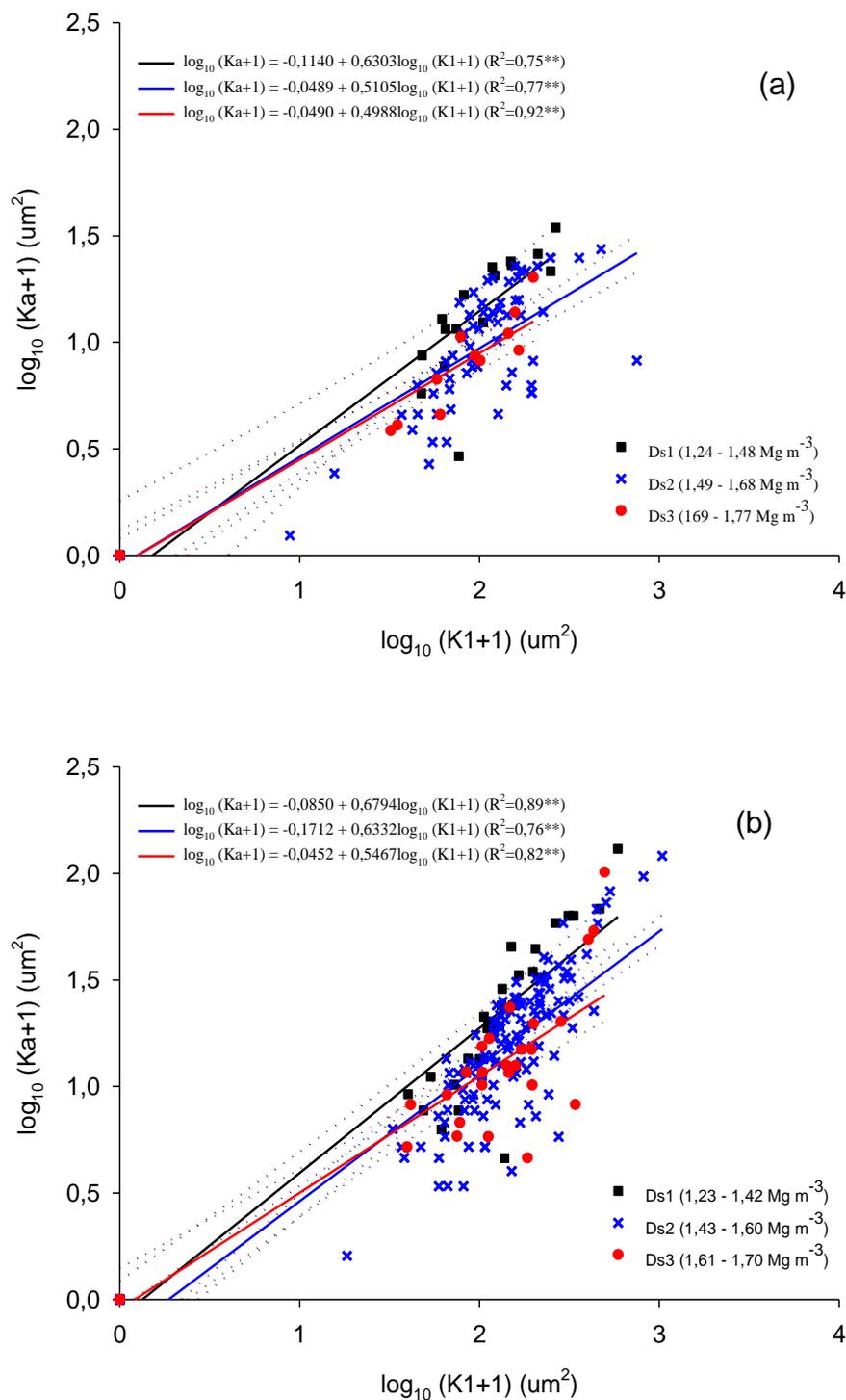


Figura 33 – Relação da permeabilidade ao ar [$\log_{10}(Ka+1)$] com continuidade de poros [$\log_{10}(K1+1)$] em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5 % (*) e 1% (**) de erro.

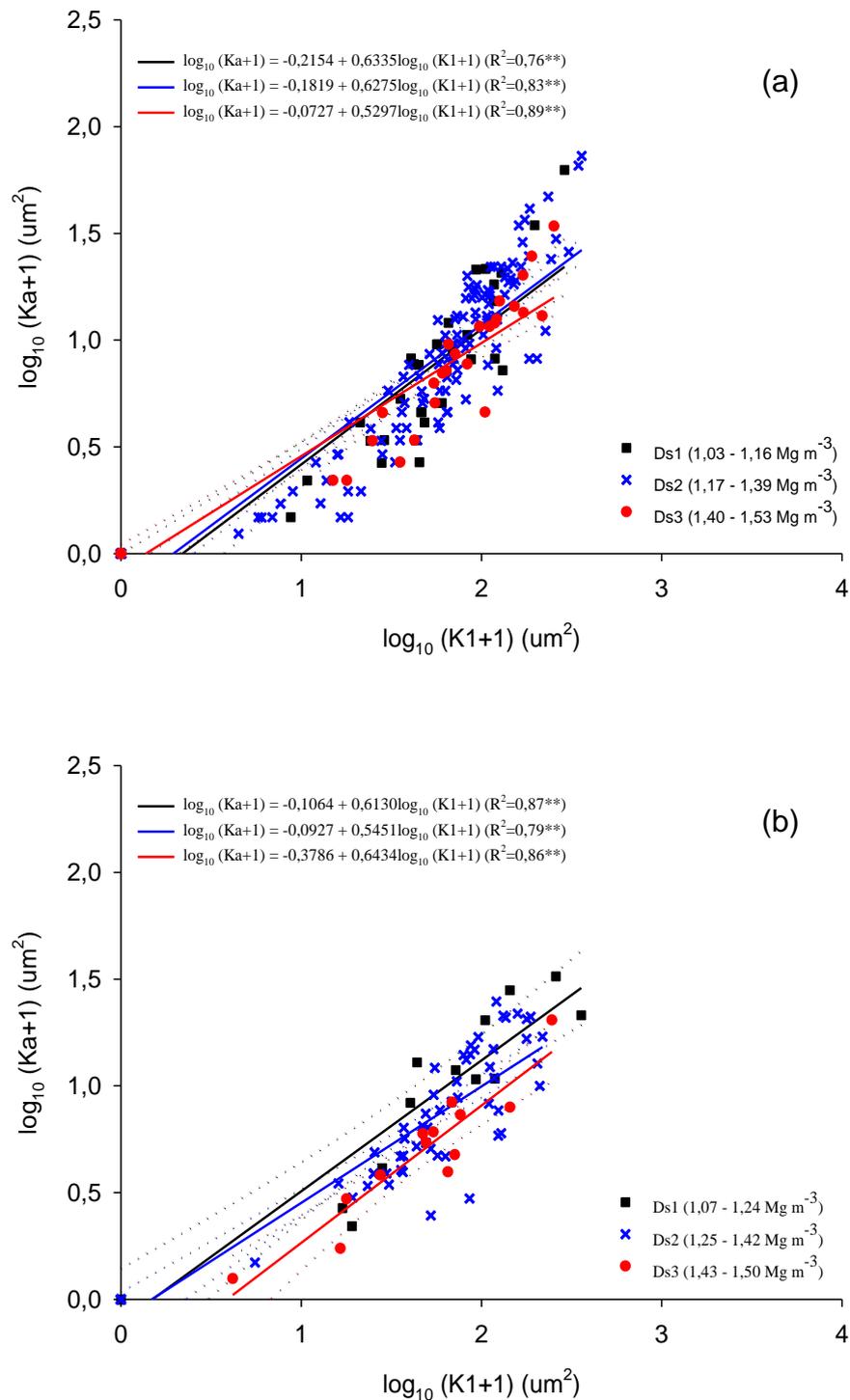


Figura 34 – Relação da permeabilidade ao ar [$\log_{10}(Ka+1)$] com a continuidade de poros [$\log_{10}(K1+1)$] em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e um Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5 % (*) e 1% (**) de erro.

O efeito da U_v no comportamento da K_a foi objeto de algumas pesquisas. Em dois Nitossolos argilosos, Silva et al. (2009) observaram que, à medida que a U_v reduziu, os valores de K_a aumentaram, comportamento explicado pelos autores em função da formação de caminhos preferenciais contínuos através dos poros quando a água é drenada. Em um solo construído e que continha 97% de areia, o aumento na quantidade de poros bloqueados por água em função do aumento da U_v também afetou a K_a , reduzindo seus valores (SEYFRIED; MURDOCK, 1997). Assim, considerando os dados e pesquisas, nota-se que o efeito negativo da U_v na K_a existe, porém indireto, uma vez que a redução na U_v proporciona uma maior quantidade de poros livres (ou seja, E_a), mas que esses, obrigatoriamente, necessitam ser contínuos (ou não bloqueados) para que o fluxo de ar ocorra no solo.

A relação da K_a com a E_a , segundo o modelo exponencial proposto por Ahuja et al. (1984), porém com a transformação logarítmica indicada por Ball et al. (1988), está representada nas Figuras 35 e 36 e os resultados estatísticos na Tabela 17. Comparativamente ao observado na relação K_a versus U_v , os valores de R^2 foram superiores, indicando que a E_a é fundamental para os fluxos de ar no solo, sendo que, à medida que esta aumenta, maiores valores de K_a são observados, semelhante aos trabalhos anteriormente citados (SEYFRIED; MURDOCK, 1997; SILVA et al., 2009). Avaliada na mesma tensão em solos urbanos, florestais e utilizados com lavoura de oito locais da Dinamarca, Deepagoda et al. (2011) observaram que o incremento na E_a é responsável por maiores valores de K_a .

Em um Latossolo Vermelho com textura muito argilosa cultivado sob preparo convencional e plantio direto durante 23 anos, Rodrigues et al. (2011) observaram que, mesmo com uma porosidade elevada, a K_a pode ser nula caso todos os poros estejam preenchidos com água e/ou não estejam conectados. No entanto, à medida que maiores tensões foram aplicadas ao solo, a E_a aumentou, elevando de forma exponencial os valores de K_a . Esse aumento, segundo constatações de Moldrup et al. (2001) em oito diferentes solos com variação na classe textural e por Schønning et al. (2002) em dois solos franco arenosos cultivados sob diferentes sistemas de manejo e rotação de culturas durante 50 anos, ocorre devido à redução da tortuosidade e ao aumento no número de poros que atuam no fluxo quando aumenta a E_a , o que favorece a ocorrência de maiores valores de K_a .

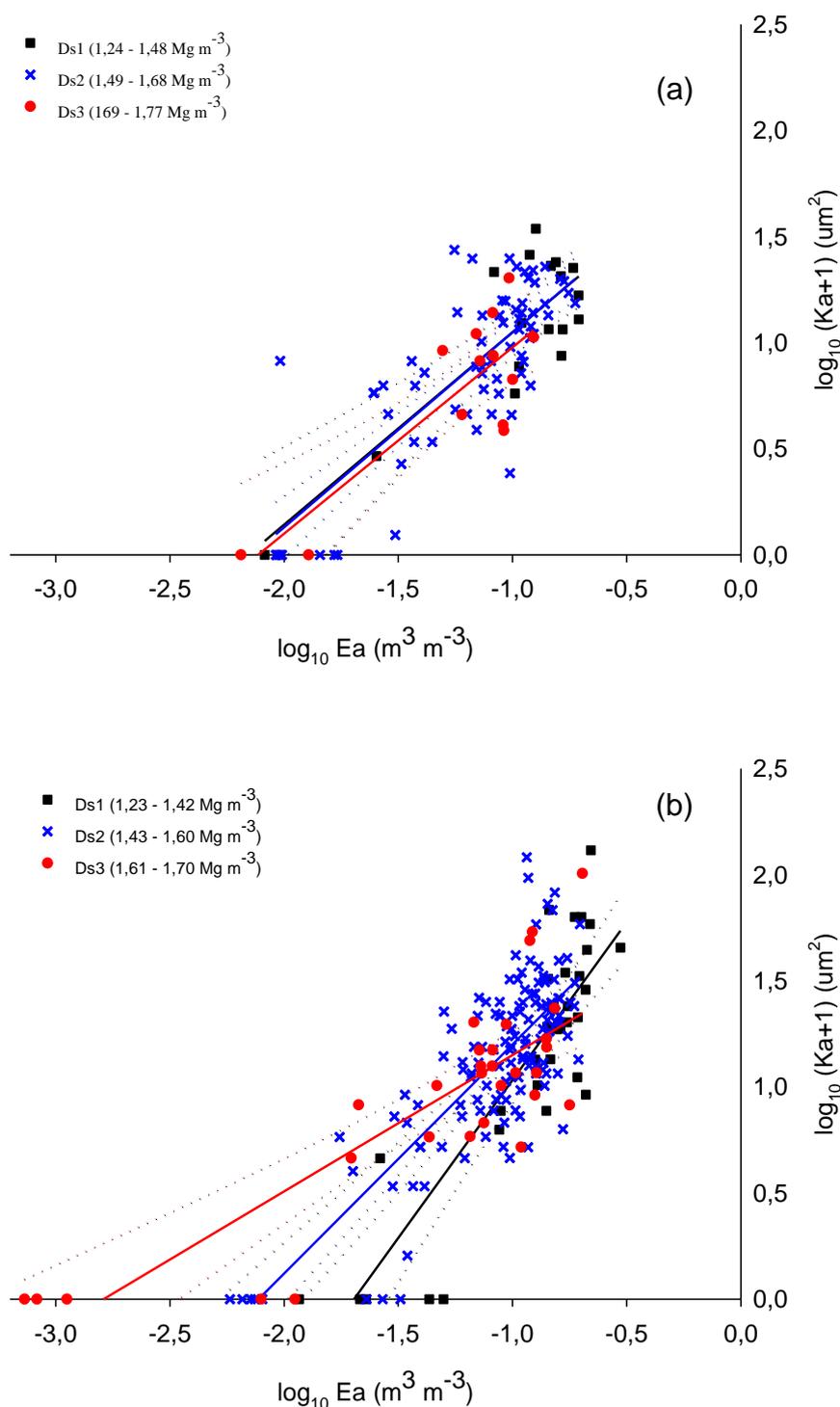


Figura 35 – Relação logarítmica entre a permeabilidade ao ar [$\log_{10} (Ka+1)$] e a porosidade de aeração ($\log_{10} Ea$) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria (a) e um Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5 % (*) e 1% (**) de erro.

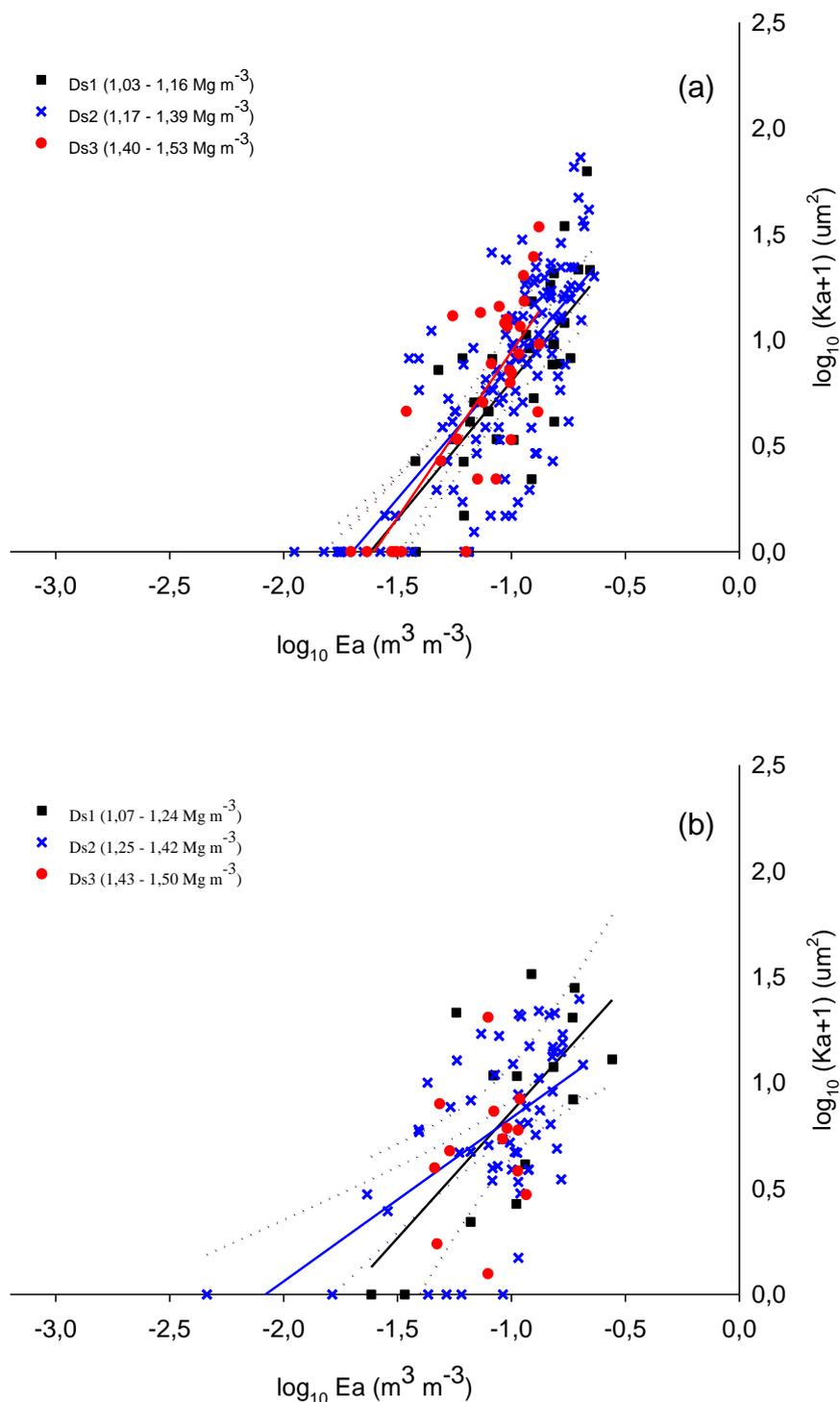


Figura 36 – Relação logarítmica entre a permeabilidade ao ar [$\log_{10} (Ka+1)$] e a porosidade de aeração ($\log_{10} Ea$) em um Latossolo Vermelho Distroférico típico – Victor Graeff (a) e um Latossolo Vermelho Distroférico típico - Não-Me-Toque (b) em diferentes classes de densidade do solo. As linhas pontilhadas referem-se ao intervalo de confiança (IC) para as relações significativas até a probabilidade de 5 % (*) e 1% (**) de erro.

Tabela 17 – Parâmetros da regressão do modelo $\log_{10} (Ka+1) = \log_{10} M + N \log_{10} Ea$ e porosidade de aeração bloqueada (Eb) de diferentes classes de densidade dos solos avaliados.

Classes (Ds)	$\log_{10} M$	N	R ²	Eb (%)	n
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – Santa Maria					
Ds1	1,96	0,90	0,67*	0,67	17
Ds2	1,97	0,92	0,64*	0,73	69
Ds3	1,84	0,86	0,65*	0,74	13
Latossolo Vermelho Distrófico típico - Passo Fundo					
Ds1	2,52	1,49	0,74*	2,03	32
Ds2	2,28	1,08	0,61*	0,77	132
Ds3	1,81	0,66	0,69*	0,18	30
Latossolo Vermelho Distroferrico típico – Victor Graeff					
Ds1	2,10	1,29	0,57*	2,37	34
Ds2	2,15	1,26	0,58*	2,00	126
Ds3	2,52	1,57	0,62*	2,50	32
Latossolo Vermelho Distroferrico típico - Não-Me-Toque					
Ds1	2,05	1,19	0,45*	1,87	14
Ds2	1,61	0,78	0,31*	0,85	60
Ds3	1,06	0,34	-0,06 ^{ns}	0,07	13

Comparando a qualidade dos ajustes dos dados ao modelo (Tabela 17) entre os solos avaliados, novamente o R² foi maior nos solos arenosos (PVAd e LVd) e diminuiu nos solos argilosos (LVdf-VG e LVdf-NMT), semelhantemente ao observado na relação da Ka com a Uv (Figura 22). Além disso, novamente não houve significância de ajuste do modelo para a classe com as amostras mais compactadas (Ds3) do LVdf-NMT. Este comportamento indica que, em solos argilosos, o efeito da Uv não é tão expressivo quanto em solos arenosos no comportamento da Ka. Caracteristicamente, solos argilosos apresentam uma conformação estrutural diferente dos arenosos, com uma quantidade total de poros maior e, nestes, predominando microporos. Essa particularidade proporciona aos solos argilosos uma maior retenção de água e uma menor continuidade de poros, o que repercute em menores taxas de incremento da Ka à medida que a Ea se eleva (MOSADDEGHI et al., 2007; DEEPAGODA et al., 2011).

Para um melhor entendimento de como o fluxo de ar ocorre no solo e, principalmente, da relação da umidade com os poros que atuam nos fluxos, nas Figuras 27 e 28 é apresentada a relação entre a Ea e a Uv para os solos em estudo. Como era esperado, a redução do conteúdo de água no solo favorece o aumento dos poros ocupados por ar, ou seja, aqueles responsáveis pela Ka. Os R² obtidos

para as equações lineares ajustadas foram altos, com valores de R^2 variando de 0,67 a 0,92. Contudo, frente à similaridade nos valores do intercepto e, principalmente, do coeficiente angular das equações obtidas, não foi possível diagnosticar um efeito direto do conteúdo de argila na relação em questão e associá-lo às diferenças observadas no comportamento dos solos arenosos e argilosos quanto às relações da K_a com a U_v e E_a (Figuras 31, 32, 35 e 36).

A D_s , por afetar a geometria e a continuidade do sistema poroso, pode afetar o comportamento dos fluxos de ar no solo (SILVA et al., 2009), além de efeitos indiretos na E_a , como pode-se observar nas Figuras 27 e 28. A relação entre a E_a e a U_v foi afetada pela condição de compactação das amostras, indicado pelo intervalo de confiança (IC) das relações obtidas nas diferentes classes de D_s . Os IC indicaram que amostras com maior D_s apresentam uma menor E_a . Essa constatação é muito importante quando se procura explicar os efeitos da compactação do solo na K_a , pois, como já observado e discutido anteriormente, essa variável é dependente diretamente da E_a . Via de regra, observa-se que o efeito direto da compactação é um aumento na densidade e redução na porosidade total e, principalmente, dos macroporos (SIMOJOKI et al., 2008; WEISSKOPF et al., 2010), reduzindo, assim, o espaço aéreo e o índice de vazios (TANG et al., 2011).

Apesar da compactação influenciar a E_a dos solos avaliados, esses efeitos não causaram grandes alterações no comportamento da K_a quando em função da E_a (Figuras 35 e 36), não sendo observado um efeito claro da D_s . Contudo, na relação K_a versus U_v (Figuras 31 e 32), esse efeito foi observado. Considerando os IC das equações lineares ajustadas, as faixas de D_s mais elevadas provocaram menores valores de K_a , principalmente, quando as amostras estavam com elevada condição de U_v . Baixos valores de K_a , especialmente em solos que estão compactados e com uma elevada umidade, podem afetar diretamente o crescimento e a produtividade das culturas, principalmente pela restrição à aeração (STEPNIEWSKI et al., 1994). Além disso, baixos valores de K_a podem repercutir na conservação do solo em que ocorrem. Trabalhos comprovaram a relação da K_a com outras variáveis também sensíveis à estrutura e indicadoras de fluxo de água no solo, como a condutividade hidráulica (CHIEF et al., 2008) e a taxa de infiltração de água (SEYFRIED; MURDOCK, 1997), tanto que Horn et al. (2007) apontam que uma possível redução na K_a pode indicar problemas de estagnação de água ou

elevada U_v e culminar num aumento nas possibilidades de ocorrências de processos erosivos.

Algumas pesquisas apontaram a continuidade de poros também como uma das responsáveis pelo K_a (SILVA et al., 2009; RODRIGUES et al., 2011; DEEPAGODA et al., 2011), com dependência da condição estrutural mas, principalmente, da quantidade de água no solo (SEYFRIED; MURDOCK, 1997; SCHØNNING et al., 2002). Porém, quando foi relacionado o índice K_1 com a U_v (Figuras 29 e 30), as equações lineares ajustadas apresentaram baixos valores de R^2 , o que demonstra que, além da U_v , outras variáveis também afetam a continuidade, como a D_s e a granulometria do solo. Embora nem todas as classes de D_s e todos os solos avaliados apresentassem relação significativa entre o K_1 e a U_v , as Figuras 29a,b e 30c indicam que, em maiores condições de U_v , existe uma ligeira diferença quanto aos níveis de compactação, sendo que, em camadas menos densas, foi observado uma maior continuidade de poros. A estrutura do solo é alterada por pressões externas que superam a resistência dos agregados destroem a continuidade de poros existentes e criam uma estrutura mais densa e menos permeável (SIMOJOKI et al., 2008).

No LVdf-NMT nenhuma relação significativa entre a K_1 e a U_v foi observada, independente da classe de D_s considerada. Desse comportamento é possível interpretar que a característica estrutural dos solos argilosos passa a ser o principal fator na configuração da continuidade do sistema poroso, formando, assim, poros mais tortuosos ou menos contínuos (DEEPAGODA et al., 2011). Essa constatação complementa o comportamento observado nos solos mais argilosos, especialmente o LVdf-NMT, principalmente na relação da K_a com a U_v e a E_a (Figuras 22 e 24, respectivamente) e a repercussão em menores taxas de incremento de K_a à medida que o solo seca e a quantidade de poros preenchidos por ar se elevam.

Demonstra-se que, quanto maior a K_1 , maiores são os valores observados de K_a (Figuras 33 e 34). As equações ajustadas entre essas duas variáveis apresentaram altos valores de R^2 , sendo o menor valores de 0,75 para a classe D_{s1} do solo PVAd, mostrando claramente que a continuidade de poros é extremamente necessária para que os fluxos de ar ocorram no solo. Os IC ajustados não indicaram um efeito claro da D_s na relação da K_a como a K_1 .

A constante empírica N , definida como o coeficiente angular da relação logarítmica ajustada entre o K_a e a E_a , também é considerada como um índice de

continuidade de poros, pois determina a porcentagem de abertura dos caminhos dos poros contínuos disponíveis para o fluxo de ar com o aumento da E_a (RODRIGUES et al., 2011). Os maiores valores observados para essa constante ocorreram no LVdf-VG (Tabela 17) e não apresentaram, porém, um comportamento que poderia caracterizar o efeito da granulometria na continuidade de poros, diferentemente do observado para o índice K_1 , que apresentou os maiores valores médios e máximos para os solos arenosos (LVd e PVAd) (Tabela 2).

Um comportamento da constante N em função de um aumento ou redução na condição de compactação (classes de D_s) também não foi possível de identificar, impossibilitando maiores inferências a respeito desta informação (Tabela 17). Quanto à E_b , os dados estatísticos indicaram um maior volume de poros bloqueados para o LVdf-VG, enquanto que, para os demais solos, novamente não houve um comportamento característico. A constatação da maior E_b no LVdf-VG relaciona-se e complementa ao já abordado neste trabalho, em que a característica estrutural dos solos argilosos tende a afetar diretamente o comportamento da K_a , inclusive pela maior quantidade de poros bloqueados para a realização dos fluxos de ar.

6 CONCLUSÕES

A condição estrutural (densidade do solo e índice de vazios) afeta diretamente a elasticidade do solo, principalmente em solos arenosos, a qual é reduzida com o aumento da compactação do solo. Em solos argilosos o efeito da estrutura na elasticidade do solo é menor e a argila e o carbono orgânico passam a ser propriedades importantes, proporcionando maiores valores de elasticidade.

A variação no conteúdo de água no solo apresentou um efeito reduzido na elasticidade dos solos avaliados.

As análises realizadas indicaram que a variável estrutural (densidade do solo) afetou as propriedades compressivas avaliadas, com maiores efeitos nos solos arenosos. A pressão de preconsolidação aumentou e o índice de compressão diminuiu à medida que os valores de densidade se elevaram.

Solos argilosos são mais suscetíveis à compactação e possuem menor capacidade de suporte de carga que solos arenosos. Em solos arenosos o conteúdo de água no solo pouco afeta a suscetibilidade à compactação, sendo que está é mais afetada pela densidade do solo, enquanto que, em solos argilosos, é o conteúdo de água que influencia no comportamento da suscetibilidade à compactação do solo ao longo de um ciclo de cultivo.

As modificações realizadas ao modelo de Busscher não foram eficientes em estimar a suscetibilidade à compactação no longo do tempo, apresentando resultados incoerentes se considerado o observado na relação entre o índice de compressão e o conteúdo de água solo. Contudo, para a estimativa da pressão de preconsolidação, apesar da baixa confiabilidade de ajuste dos modelos, foi possível demonstrar que os valores de pressão de preconsolidação variam ao longo do tempo, ocasionando, assim, variações na capacidade de suporte carga durante um ciclo de cultivo.

Em solos cultivados sob plantio direto, o efeito do conteúdo de água na permeabilidade ao ar está associado à maior quantidade e continuidade de poros do solo disponíveis para que os fluxos de ar ocorram, uma vez que essas duas variáveis, porosidade de aeração e continuidade de poros, apresentaram alta relação com a permeabilidade do solo ao ar. Por apresentarem diferenças quanto a

essas variáveis (continuidade de poros e porosidade de aeração), em solos arenosos o incremento na permeabilidade ao ar à medida que a conteúdo de água do solo reduz é maior se comparado a solos argilosos.

Os efeitos da compactação na permeabilidade ao ar se concentram, principalmente, na redução da porosidade de aeração e da continuidade de poros à medida que a densidade é maior, independentemente do conteúdo de água do solo, o que repercute negativamente nos valores de permeabilidade ao ar.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo procurou elucidar algumas questões referentes às deformações plásticas e elásticas que ocorrem no solo. Especial atenção foi direcionada aos efeitos da condição estrutural (densidade do solo e índice de vazios), da composição e do conteúdo de água do solo, propriedades com potenciais efeitos nas propriedades mecânicas do solo e que, por consequência, tendem a afetar o processo de compactação.

Observaram-se diferenças quanto ao comportamento compressivo e elástico entre solos arenosos e argilosos. A maior porosidade total, microporosidade e, por consequência, capacidade de retenção de água de solos argilosos afeta diretamente as deformações que neles ocorrem quando pressões são aplicadas por máquinas e implementos agrícolas. Os resultados indicaram que solos argilosos são mais elásticos, apresentam uma menor capacidade de suporte de carga e são mais suscetíveis à compactação que solos arenosos, principalmente quando estão em condições de elevada umidade.

Assim, os efeitos da umidade nas deformações ocorrem, mas não na mesma intensidade para várias classes de classe de solo e estão associados à composição dos mesmos. Como exemplo, cita-se o comportamento observado em solos arenosos, nos quais tanto as deformações elásticas quanto as deformações plásticas mostraram-se pouco sensíveis à condição de umidade do solo e sofreram maior influência condição estrutural. Solos com maior densidade apresentam menor elasticidade e suscetibilidade à compactação do solo e maior capacidade de suporte de carga. No entanto, essas condições podem indicar uma degradação estrutural, que pode afetar negativamente outras propriedades do solo, como a permeabilidade ao ar.

Quando ocorrem deformações elásticas, têm-se como consequências a redução na porosidade de aeração e na continuidade de poros, condição que irá afetar negativamente a permeabilidade ao ar. Contudo, os resultados indicaram que, independente a condição de compactação, é o conteúdo de água no solo o principal fator no comportamento da permeabilidade ao ar, pois afeta a quantidade e continuidade de poros do solo disponíveis para que os fluxos de ar ocorram.

Também para essa variável, o efeito da granulometria está presente. Solos arenosos apresentam maiores valores de permeabilidade ao ar se comparados a argilosos.

Embora os resultados tenham demonstrado que a capacidade de suporte de carga do solo está abaixo das pressões aplicadas por máquinas agrícolas em grande parte de um ciclo de cultivo, evitar que o problema (a compactação) ocorra parece ser a condição mais viável. Assim, é essencial que se evite o tráfego em condições de elevada umidade, quando a elasticidade e a capacidade de suporte de carga estão reduzidas e a suscetibilidade à compactação é maior, especialmente em solos argilosos. Contudo, práticas conservacionistas e de manejo do solo que visem à elevação no teor de matéria orgânica do solo são importantes, uma vez que esta é um dos principais agentes no comportamento da elasticidade dos solos, principalmente dos arenosos.

O modelo utilizado para a estimativa da capacidade de suporte de carga do solo apresentou uma baixa confiabilidade. Contudo, novas experiências que visem à validação de modelos que estimem a capacidade de suporte são necessárias e podem indicar ao produtor rural respostas como qual é o período necessário, após uma completa saturação do solo, que este deve aguardar para que possa trafegar, por exemplo, com um trator, uma colhedora ou um pulverizador auto-propelido em sua lavoura cultivada sob um Latossolo argiloso, localizada na município de Victor Graeff, sem que cause compactação do solo. Bem como, quanto tempo teria que esperar na sua lavoura cultivada num Argissolo franco arenoso, localizado em Santa Maria.

Enfim, essas são respostas que, em função da baixa confiabilidade do modelo, não foram possíveis de serem respondidas neste trabalho. Contudo, será que realmente a variável pressão de preconsolidação indica a real capacidade de suporte de carga do solo? São perguntas a se pensar (e avaliar) para o futuro.

8 LITERATURA CITADA

AHUJA, L. R. et al. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 1, p. 699-702, jul., 1984.

ALAKUKU, L. et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review. Part 1. Machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1-2, p. 145-160, oct., 2003.

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 300p. (Irrigation and Drainage, n.56), 1998.

AMADO, T. J. C. Estará realmente o plantio direto gaúcho sendo mal conduzido?. **Boletim Informativo Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha**, Boletim Informativo, n.43, p. 5-6, jan/mar., 2011.

ARAUJO-JUNIOR, C. F. et al. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 115-131, jan./fev., 2011.

ARVIDSSON, J; KELLER, T. Soil precompression stress: I. A survey of Swedish arable soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 77, p. 85-95, may., 2004.

BALL, B.C.; O'SULLIVAN, M.F.; HUNTER, R. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. **European Journal of Soil Science**, v. 39, n. 3, p. 327-339, sep., 1988.

BRAIDA, J. A. et al. Teor de carbono orgânico e a suscetibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, p. 131-139, fev., 2010.

BRAIDA, J. A. et al. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 477-485, mar./abr., 2008.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **American Society of Agricultural Engineers**, Michigan, v. 33, n. 2, p. 519-524, mar./apr., 1990.

CARDOSO, V. M. F. **Sustentabilidade estrutural de um solo na região do Alto Paranapanema/sp, submetido a dois sistemas de cultivo**. 2007. 121f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2007.

CAVALIERI, K. M. V. et al. Determination of precompression stress from uniaxial compression tests. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 98, n. 1, p. 17-26, jan., 2008.

CHIEF, K.; FERRÉ, T. P. A.; NIJSSEN, B. Correlation between air permeability and saturated hydraulic conductivity: unburned and burned soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 72, n. 6, p. 1501-1509, nov./dec., 2008.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira – Grãos Safra 2013/2014**, p. 72, dez., 2013.

DEBIASI, H. et al. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. especial, p. 2629-2637, out./dez., 2008.

DEEPAGODA, T. K. K. C. et al. Density-corrected models for gas diffusivity and air permeability in unsaturated soil. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 10, n. 1, p. 226-238, feb., 2011.

DIAS JÚNIOR, M. S. et al. Método alternativo de avaliação da pressão de preconsolidação por meio de um penetrômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 805-810, set./out., 2004.

DIAS JUNIOR., M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 175-182, maio/ago., 1996.

DÖRNER, J. et al. Effect of land use change on Andosol's pore functions and their functional resilience after mechanical and hydraulic stresses. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 115-116, p. 71-79, oct./nov., 2011.

DOURADO-NETO, D. et al. Balance hídrico ciclico y secuencial: estimación de almacenamiento de agua en el suelo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 3, p. 537-546, jul., 1999.

ÉDEN, M. et al. Compaction and rotovation effects on soil pore characteristics of a loamy sand soil with contrasting organic matter content. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 27, n. 3, p. 340-349, sep., 2011.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa em solos. **Manual de métodos de análise de solos**. Brasília - DF: EMBRAPA. 1997. 212p.

EMBRAPA. Informática Agropecuária. **Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes**. Campinas: EMBRAPA, 1999. 370p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa em solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília - DF: EMBRAPA. 2006. 412p.

FARIAS, J. R. B. et al. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 3, p. 415-421, dez., 2001.

FEBRAPDP - Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha – FEBRAPDP. Disponível em <http://www.febrapdp.org.br/> (acessado em 05 de outubro de 2014 às 19:30 horas).

GOULART, R. Z. **Modelagem da curva de compressão e da pressão de preconsolidação do solo**. 2012. 67f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

GREGORY, A. S. et al. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. **Soil and Tillage Research.**, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 45-57, aug., 2006.

GREGORY, A. S. et al. The effect of long-term soil management on the physical and biological resilience of a range of arable and grassland soils in England. **Geoderma**, Amsterdam, v. 153, p. 172-185, oct., 2009.

GROENEVELT, P. H.; KAY, B .D.; GRANT, C. D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, Amsterdam, v. 34, n. 2, p. 101-114, nov., 1984.

GUBIANI, P. I et al. Software AreaMed desenvolvido para medição de áreas a partir de imagens digitais. In: XXXII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2009, Fortaleza. Resumos do XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo: O Solo e a Produção de Bioenergia: Perspectivas e Desafios. Fortaleza : Universidade Federal do Ceará, 2009.

GUBIANI, P. I. **Regularidade de resposta da cultura do milho à compactação do solo**. 2012. 152f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo - exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v 36, n. 2, p. 664-668, mar./abr., 2006.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey: Prentice-Hall, 1981, 733 p.

HORN, R. et al. Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. **Forest Ecology and Management**, v. 248, p. 56-63, aug., 2007.

HORN, R. Time dependence of soil mechanical properties and pore functions for arable soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 68, n. 4, p. 1131-1137, jul./aug., 2004.

IMHOFF, S. et al. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 68, n. 1, p. 17-24, nov./dec., 2004.

KELLER, T. et al. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. **Geoderma**, Amsterdam, v. 163, p. 13-23, jun., 2011.

KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 635-660.

KOOLEN, A. J. Mechanics of soil compaction. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. (Ed) **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 45-69.

KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water relations of plants and soils**. San Diego: Academic Press, 1995. 481p.

McCARTHY, K. P.; BROWN, K. W. Soil gas permeability as influenced by soil gas-filled porosity. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 56, n. 4, p. 997-1003, jul./aug., 1992.

MENTGES, M. I. et al. Alterações estruturais e mecânicas de solo de várzea cultivado com arroz irrigado por inundação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 221-231, fev., 2013.

MENTGES, M. I. et al. Propriedades físico-hídricas do solo e demanda energética de haste escarificadora em Argissolo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 3, p. 315-321, mar., 2010.

MIRANDA, E. E. V. et al. Efeito do manejo e do tráfego nos modelos de sustentabilidade da estrutura de um Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiros. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, Edição Especial, p. 1506-1515, dez., 2003.

MOLDRUP, P. et al. Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 65, n. 3, p. 613-623, may./jun., 2001.

MOSADDEGHI, M. R. et al. Suitability of pre-compression stress as the real critical stress of unsaturated agricultural soils. **Biosystems Engineering**, v. 98, n. 1, p. 90-101, sep., 2007.

OLIVEIRA, G.C. et al. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 1, p. 47-50, jan., 2003.

ONU - (UNITED NATIONS/DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS). **Seven Billion and Growing: the Role of Population Policy in Achieving Sustainability**. Technical Paper, n. 3, p. 44, 2011.

PERDOK, U. D.; KROESBERGEN, B.; HOOGMOED, W. B. Possibilities for modeling the effect of compression on mechanical and physical properties of various Dutch soil types. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, p. 61-75, apr., 2002.

PEREIRA, A. R. et al. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242-254, mar., 2009a.

REICHERT, J. M. et al. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 3, p. 310-319, mar., 2009b.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**, volume 5. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 49-134, 2007.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SUZUKI, L.E.A.S.; HORN, R. Mecânica do solo. In: van LIER, Q.J. **Física do solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 30-102.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, nov./dez., 2006.

RODRIGUES, S. et al. Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 105 – 114, jan./fev., 2011.

ROSEBERG, R. J.; McCOY, E. L. Tillage and traffic-induced changes in macroporosity and macropore continuity: air permeability assessment. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 52, n. 4, p. 1261-1267, jul./aug., 1992.

SAFFIH-HDADI, K. et al. Method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, p. 96-103, sep., 2009.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT procedure guide for personal computers**. 5.ed. Cary, 1999.

SCHJØNNING, P. et al. Modelling soil pore characteristics from measurements of air exchange: the long-term effects of fertilization and crop rotation. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 53, n. 2, p. 56-63, jun., 2002.

SEVERIANO, E. C. et al. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I - modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**, v. 30, p. 404-413, jun., 2010.

SEYFRIED, M. S.; MURDOCK, M. D. Use of air permeability to estimate infiltrability of frozen soil. **Journal of Hydrology**, v. 202, n. 1-4, p. 97–107, dec., 1997.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 921-930, nov./dez., 2006.

SILVA, A. P. et al. Funções de pedotransferência para curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 1-10, jan./fev., 2008.

SILVA, A. P. et al. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1535 – 1545, nov./dez., 2009.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 4, n. 2, p. 239-249, abr./jun. 2000.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.2, p.399-406, mar./abr., 2004.

SIMOJOKI, A.; FAZEKAS-BECKER, O.; HORN, R. Macro and microscale gaseous diffusion in a Stagnic Luvisol as affected by compaction and reduced tillage. **Agricultural and Food Science**, v. 17, n. 3, p. 252-264, jun., 2008.

SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. (ed). **Soil compaction in crop production**. Netherlands : Elsevier, p.1-21, 1994.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactability: A review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, n. 1-2, p. 179-201, apr., 1990.

STEPNIEWSKI, W.; GLINSKI, J.; BALL, B. C. Effects of compaction on soil aeration properties. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. (ed). **Soil compaction in crop production**. Netherlands : Elsevier, p.167-189, 1994.

SUZUKI, L. E. A. S. **Compactação do solo e sua influencia nas propriedades físicas e crescimento e rendimento de culturas**. 2005. 159f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Estimativa da susceptibilidade a compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 963-973, maio/jun., 2008.

TANG, A. M. et al. A study on the air permeability as affected by compression of three French soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 162, n. 1-2, p. 171-181, apr., 2011.

THORTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Publications in Climatology**, v. 3, p. 1-104, 1955.

TILMAN, D. et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**. v. 108, n. 50, p. 20260-20264, dec., 2011.

TULI, A. et al. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 5, p. 1361-1371, sep./oct., 2005.

USDA – Soil Survey Staff. **Soil Taxonomy – a basic system of soil classification for making and interpreting soil survey**. 2 ed., Washington: USDA. 1999. 871 p.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, sept., 1980.

VEIGA, M. et al. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long – term tillage systems. **Soil and Tillage Research**., Amsterdam, v. 92, n. 1-2, p. 104-113, jan., 2007.

VOGELMANN, E. S. et al. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo trafegado e escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, vol. 42 n. 2, p. 291 -297, fev., 2012.

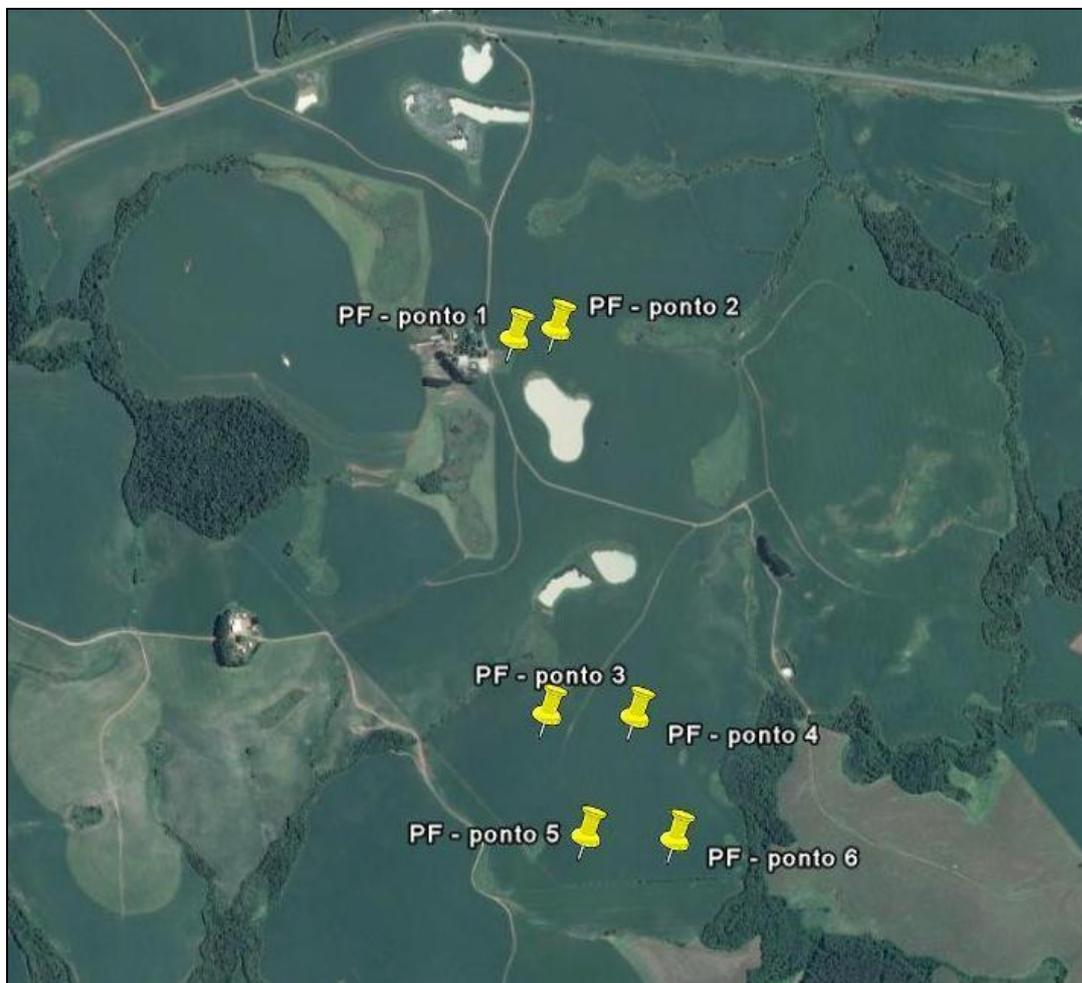
WEISSKOPF, P. et al. Effect of different compaction impacts and varying subsequent management practices on soil structure, air regime and microbiological parameters. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, n. 1, p. 65-74, dec., 2010.

ZHANG, B.; HORN, R.; HALLETT, P.D. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, p. 864-871, may., 2005.

Anexo 1 - Pontos amostrados na lavoura de soja localizada no município de Santa Maria (imagem retirada do Google Earth).



Anexo 2 - Pontos amostrados na lavoura de soja localizada no município de Passo Fundo (imagem retirada do Google Earth).



Anexo 3 - Pontos amostrados na lavoura de soja localizada no município de Victor Graeff (imagem retirada do Google Earth).



Anexo 4 - Pontos amostrados na lavoura de soja localizada no município de Não-Me-Toque (imagem retirada do Google Earth).

